

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

“Diseño de sensores anti-hurto basados en  
aleaciones ferromagnéticas”

Alumno: Miguel Gómara Chivite

Tutora: Cristina Gómez Polo

Pamplona, 26 de julio del 2012

# -Índice-

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Objetivo del proyecto</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Sistemas de etiquetas antirrobo comerciales. Principios.</b>	<b>6</b>
1.2.1 EAS magnético	6
1.2.2 EAS acústico-magnético (magnetoelástica)	7
1.2.3 EAS de Radiofrecuencia	9
<b>1.3 Sistemas de detección</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Falsas alarmas, orientación y blindaje</b>	<b>11</b>
 <b>CAPÍTULO 2: ETIQUETAS MAGNÉTICAS (EAS) ARMONICAS. FUNDAMENTOS</b>	 <b>14</b>
<b>2.1 Campo magnético creado por una corriente eléctrica.</b>	
<b>Ley de Biot y Savart</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Flujo magnético</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Ley de Faraday</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Campos magnéticos en medios materiales.</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Clases de materiales magnéticos</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Ferromagnetismo. Teoría de dominios.</b>	<b>20</b>
<b>2.7 Ciclo de histéresis</b>	<b>22</b>
<b>2.8 Materiales magnéticos blandos y duros.</b>	<b>25</b>
<b>2.9 Fuerza electromotriz inducida empleando materiales ferromagnéticos blandos como multiplicadores de flujo magnético.</b>	<b>27</b>
<b>2.10 Aproximación teórica a la curva de magnetización.</b>	<b>28</b>
<b>2.11 Principio de funcionamiento de las etiquetas magnéticas armónicas.</b>	<b>30</b>
2.11.1 Activación/Desactivación de la etiqueta.	30

<b>CAPÍTULO 3: MATERIALES EMPLEADOS EN ETIQUETAS MAGNÉTICAS ARMÓNICAS</b>	<b>33</b>
3.1 Aleaciones ferromagnéticas (cintas)	33
3.2 Hilos ferromagnéticos amorfos	36
<b>CAPÍTULO 4: MATERIALES E INSTRUMENTAL EMPLEADO</b>	<b>39</b>
4.1 Materiales empleados	39
4.2 Equipos empleados	45
<b>CAPÍTULO 5: ESTUDIOS REALIZADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Caracterización de los campos creados.	50
5.2 Caracterización de una etiqueta EAS armónica comercial.	51
5.3 Comparativa hilos ferromagnéticos frente a cintas ricas en Co.	55
5.3.1 Caracterización de los materiales en frecuencia.	55
5.3.2 Influencia de los campos continuos en los materiales blandos.	63
5.3.3 Tasas de detección según la distancia de los receptores.	65
5.3.4 Tasas de detección según el campo inducido.	67
5.3.5 Detección del material en bobinas detectoras.	69
5.3.6 Análisis etiquetas definitivas.	72
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>81</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS-**

## **1 Introducción y objetivos**

El principal objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el análisis de etiquetas antirrobo EAS (Electronic Article Surveillance) empleando aleaciones amorfas con propiedades optimizadas. En concreto, se realizará un estudio comparativo de la respuesta de aleaciones amorfas en forma, de cinta y de hilo, caracterizados por presentar un comportamiento magnético diferenciado.

La base de estas etiquetas es un material ferromagnético extremadamente blando (coercitividades inferiores a 1 A/m) y alta remanencia reducida (superior a 0,8). El ciclo de histéresis da lugar a la generación de armónicos en la señal inducida bajo excitación sinusoidal. La activación / desactivación de la etiqueta se produce mediante el control del campo remanente producido por un material semiduro (coercitividades del orden de 4 kA/m) situado junto al material blando generador de los armónicos.

Tradicionalmente, en las etiquetas EAS armónicas comerciales se emplean aleaciones comerciales no magnetostrictivas como VITROVAC 6025 ( $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{Si}_{16}\text{B}_{10}$ ) o METGLASS 2705 ( $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ ) y como elemento semiduro aleaciones de Fe-Co (ej. CROVAC ( $\text{Fe}_{59}\text{Co}_{12}\text{Cr}_{28}\text{Mo}_1$ )). El principal objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el análisis de nuevas etiquetas EAS empleando aleaciones amorfas donde la geometría (cinta o hilo) de la muestra determina su respuesta.

Objetivos concretos:

- a) **General.** Entender los conceptos y propiedades más importantes relacionadas con las propiedades magnéticas de nuevos materiales de interés tecnológico.
- b) **Principio de funcionamiento.** Estudiar el principio de funcionamiento de las etiquetas EAS armónicas. Optimizar su comportamiento mediante el control de la respuesta magnética de sus elementos

**c) Modelización.** Análisis de la respuesta inductiva (armónicos) de los sensores.

## **1.2 Sistemas antirrobo comerciales y sus principios de funcionamiento básicos.**

La vigilancia electrónica de artículos (EAS) es un método tecnológico para la prevención de hurtos en las tiendas al por menor o hurto de libros de las bibliotecas. Estas etiquetas especiales se fijan a la mercancía o los libros y deben ser desconectadas o extraídas por el personal de la tienda tras su correcto pago. En las salidas de la tienda, un sistema de detección puede hacer sonar una alarma o alerta cuando detecta etiquetas activas.

Tipos principales de EAS, (hay varios tipos principales):

- Magnética, también conocidos como magneto-armónica.
- Acústico-magnética o magnetostrictivo.
- Radio frecuencia

### **1.2.1 EAS magnéticas (magneto-armónica):**

Son las etiquetas que vamos a estudiar a lo largo del proyecto. Estas etiquetas están hechas de una cinta de aleación ferromagnética amorfa (por ejemplo Metglas) con valores de coercitividad bajos (comportamiento magnético blando). Excepto para las etiquetas permanentes, esta cinta, también, está acompañada de otra cinta de material ferromagnético con un campo coercitivo moderado (material semi-duro). La detección se consigue por los armónicos generados por la respuesta magnética no lineal del material sometido a campos magnéticos de baja frecuencia (en el rango de 10 a 1000 Hz) [5].



*Fig.1.1: Imagen de una etiqueta EAS armónica*

Cuando el material ferromagnético semi-duro está imanado, se produce la imanación de la cinta amorfa blanda a saturación, dando lugar a una disminución en la respuesta de los armónicos.

Este sistema es adecuado para el material en las bibliotecas ya que las etiquetas pueden ser desactivadas cuando los artículos son devueltos y se reactiva a su regreso. También es adecuado para productos de bajo valor en tiendas al por menor, debido al pequeño tamaño y un coste muy bajo de las etiquetas.

### **1.2.2 EAS magnetoelásticas:**

Constructivamente son similares a las etiquetas magnéticas, dado que están hechas con dos cintas, una cinta de aleación ferromagnética magnetoestrictiva, y una cinta magnética semi-dura, que se utiliza para permitir la desactivación. Estas cintas no están unidas entre sí, para que sean libres de oscilar mecánicamente.

Los metales amorfos se utilizan en tales sistemas, debido a su buen acoplamiento magnetoelástico, lo que implica que puede convertir eficientemente la energía magnética en vibraciones mecánicas.



Los detectores para tales etiquetas emiten impulsos frecuenciales periódicos aproximadamente a 58 kHz, (frecuencia de resonancia de las cintas amorfas). Esto hace que la cinta vibre longitudinalmente por la magnetostricción del material, y continúe oscilando después de que la excitación de pulsos haya terminado. La vibración provoca un cambio en la imanación en la cinta amorfa, que induce un voltaje alterno en la antena del receptor. Si esta señal cumple con los parámetros necesarios (frecuencia correcta, etc.) se activa la alarma.

El campo remanente del elemento semiduro refuerza la resonancia magnetoelástica del elemento amorfo magnetostrictivo dando lugar a un aumento en la señal inducida en el detector. De este modo se puede activar/desactivar la etiqueta mediante la imanación / desimanación de la cinta semidura.

Estas etiquetas son más gruesas que las etiquetas magnéticas, y por tanto, rara vez se utiliza para los libros. Sin embargo, son relativamente baratos y tienen mejores tasas de detección (menos positivos falsos y negativos falsos) que las etiquetas magnéticas [10].



*Fig. 1.2: Etiqueta magneto-acústica. Exteriormente igual que la magnética.*

### **1.2.3 EAS de radio-frecuencia**

Los sistemas de radio frecuencia (RF) son ampliamente utilizados. La imagen muestra una etiqueta EAS RF. En la parte superior lleva un EAN (European Article Number). En la parte posterior puede verse una espiral de plata brillante, se trata de una bobina, que también actúa como una antena. La barra azul en la fig. 1.3 conecta al principio y al final de la bobina con un condensador. Bobina y condensador forman un circuito resonante con la frecuencia de resonancia típica de la etiqueta.



*Fig. 1.3: Etiqueta de radio-frecuencia.*

Estas etiquetas son esencialmente un circuito LC que tiene un pico de resonancia en el intervalo de 1,75 MHz a 9,5 MHz. La frecuencia más empleada es 8,2 MHz. La detección se logra mediante el barrido alrededor de la frecuencia de resonancia. La desactivación de etiquetas de 8.2 MHz se logra principalmente mediante la desintonización del circuito al destruir parcialmente el condensador. Esto se hace mediante la exposición de la etiqueta a un fuerte campo electromagnético en la frecuencia de resonancia que induce tensiones superiores a la tensión del condensador.

El sistema generador de campo para la detección, está instalado en el área principal después de la salida. La etiqueta se debe anular después de la compra. Esto se hace o bien, mecánicamente (la eliminación de la etiqueta, cortando a través de la bobina), o bien eléctricamente (inducción de corrientes altas, que cambian el condensador y por lo tanto el circuito deja de resonar).

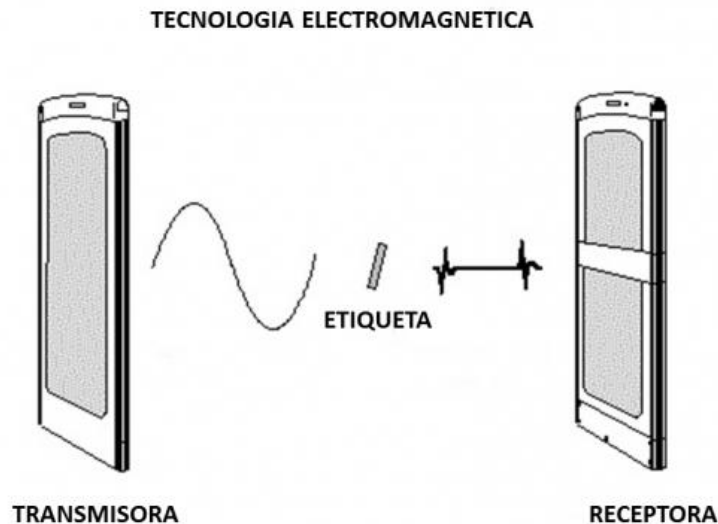
Las etiquetas de RF tienen algunas desventajas, tales como su tamaño y su baja selectividad (interacción con otros dispositivos electrónicos móviles, como audífonos, radios o teléfonos móviles...). En estos casos se obtienen alarmas no deseadas. También una orientación desfavorable respecto a la antena o por protección metálica (apantallamiento) podrá provocar que sólo el 70% de las etiquetas activas sean reconocidas [10].

Además una vez desactivada, no se puede volver a usar, su principal ventaja es su bajo precio.

### **1.3 Sistemas de detección de EAS magnéticas.**

Los sistema anti hurto (EAS) de tecnología electromagnética crean un campo electromagnético de baja frecuencia (de hasta 1 kHz normalmente) entre dos antenas. Una antena genera un campo alterno sinusoidal constante, y la otra antena lo recibe, la zona entre ambos la llamaremos zona de interrogación, y es por donde debe pasar el cliente para salir del local.

Si la zona de interrogación es atravesada por una etiqueta activada, esta responde variando el estado magnético del material de la etiqueta, que genera una señal que es rica en armónicos (múltiplos) de la frecuencia fundamental. Se utilizan técnicas electrónicas de procesamiento de señales para identificar que los armónicos se encuentran en las frecuencias y niveles correctos, y que se producen en el momento adecuado en relación con la señal del transmisor. Si se cumplen los criterios se produce una alarma.



*Fig.1.4: Esquema del sistema EAS de detección.*

## **1.4 Falsas alarmas, orientación y blindaje**

### **a).-Las falsas alarmas.**

Una de las principales preocupaciones de estos sistemas es cuando se presenta una falsa alarma. Una falsa alarma (o falso positivo) es cuando suena la alarma cuando una persona pasa a través de la puerta sin haber robado ninguna mercancía. Esto, la mayoría de las veces es debido a que las etiquetas de los productos no están adecuadamente desactivadas, pero otros factores tales como inducción por los elementos de otras tiendas, o incluso otros elementos metálicos o magnéticos (llaves) pueden activar la alarma.

### **b).-Orientación de la etiqueta.**

Las tasas de detección de todas estas etiquetas, depende de su orientación relativa a las antenas de detección. Para un par de bucles planos que forman una bobina de Helmholtz (sistema básico de detección), las líneas de campo magnético serán aproximadamente paralelas en su centro. Orientando la etiqueta para que ningún flujo magnético cruce las bobinas se

evita la detección, dado que la etiqueta no se acoplará a las bobinas. Esta deficiencia, documentada en las primeras patentes de EAS, puede ser resuelta mediante el uso de bobinas múltiples o por su inclusión en otra disposición, tales como una figura en forma de ocho. La sensibilidad seguirá siendo dependiente de la orientación, pero la detección será posible en todas las orientaciones.

### **c).- Blindaje.**

La mayoría de los sistemas pueden ser apantallados mediante la colocación de los productos etiquetados dentro de una pantalla metálica (ejemplo: bolsa de aluminio). La bolsa de refuerzo actuará como una jaula de Faraday, blindando las etiquetas de las antenas. Aunque algunos fabricantes dicen que sus sistemas acústico-magnéticos no pueden ser apantallados por bolsas metálicas, una cantidad suficiente de protección, en el orden de unas 30 capas de papel estándar de 20 micras, es capaz de derrotar todos los sistemas estándar. En el caso de las etiquetas armónicas, el apantallamiento con pantallas metálicas no es eficaz, teniéndose que emplear, en este caso apantallamientos magnéticos (ejemplo: aleaciones magnéticas de alta permeabilidad como el mumetal) [11].

# **CAPITULO 2**

## **- ETIQUETAS MAGNÉTICAS EAS ARMÓNICAS. FUNDAMENTOS.-**

## **2 Etiquetas magnéticas EAS armónicas. Fundamentos**

En este apartado se pretende dar una breve explicación sobre los principios en los que se basan las etiquetas antirrobo magnéticas basadas en armónicos. Se explican los fundamentos que abarcan desde la creación del campo de excitación, hasta los tipos de materiales ferromagnéticos y sus ciclos de histéresis.

### **2.1 Campo magnético creado por corrientes eléctricas:**

#### **Ley de Biot y Savart.**

Se puede obtener el campo magnético  $d\vec{B}$  producido por un elemento de corriente  $I \cdot d\vec{l}$  mediante la expresión:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{ecuación 2.1}$$

Donde  $\mu_0$  es una constante llamada permeabilidad del vacío, que se define como  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Newtons/Amperio<sup>2</sup>.

La expresión 2.1, conocida como ley de Biot y Savart, fue también deducida por Ampère. La fuente del campo magnetostático es un elemento de corriente  $I \cdot d\vec{l}$ , del mismo modo que la carga  $q$  es la fuente del campo electrostático. El campo magnético decrece con el cuadrado de la distancia desde la carga móvil o elemento de corriente. El campo magnético es perpendicular a  $\vec{r}$  y a la dirección del movimiento de las cargas, que es la dirección del elemento de corriente. En un punto situado a lo largo de la línea de un elemento de corriente, el campo magnético debido a dicho elemento es cero, pues el ángulo  $\Theta$  entre  $I \cdot d\vec{l}$  y el vector  $\vec{r}$  dirigido a ese punto es cero. El campo magnético debido a la corriente total en un circuito puede calcularse utilizando la ley de Biot y Savart para calcular el campo debido a cada elemento de corriente y después sumando (integrando) para todos los elementos de corriente del circuito.

### El campo creado por una espira:

La fig. 2.1 muestra un elemento de corriente  $I \cdot d\vec{\ell}$  de una espira de corriente de radio  $R$  y de vector unitario  $\hat{r}$  dirigido desde el elemento al centro de la espira. El campo magnético debido a este elemento está dirigido a lo largo del eje de la misma y su módulo viene dado por:

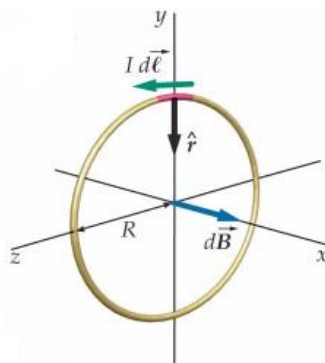
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot d\ell \cdot \sin \theta}{r^2} \quad \text{ecuación 2.2}$$

en donde  $\theta$  es el ángulo que forman  $I \cdot d\vec{\ell}$  y  $\hat{r}$ , que vale  $90^\circ$  para cada elemento de corriente, de modo que  $\sin \theta = 1$ . Por tanto el campo magnético creado por una espira completa, en el centro de esta es [6]:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot 2\pi \cdot R^2 \cdot I}{4\pi (x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{ecuación 2.3}$$

Si  $x=0$  (en el centro) entonces:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2R^3} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2R} \quad \text{ecuación 2.4}$$



*Fig. 2.1: Elemento de corriente para el cálculo de una espira de corriente circular. Cada elemento produce un campo magnético dirigido a lo largo del eje de la espira.*

### El campo creado por un solenoide largo [6]:



Se dice que un solenoide es largo si su longitud  $L$  es mucho mayor que su radio  $R$ . Un solenoide es un alambre enrollado en forma helicoidal con espiras muy próximas entre sí. Se usa para producir un campo magnético intenso y uniforme en la región rodeada por sus espiras. Considerando que  $n$  es el número de espiras por unidad de longitud, el campo magnético en el interior de un solenoide largo es:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I \quad \text{ecuación 2.5}$$

### Campo magnético creado por la bobina Helmholtz:

La bobina o carrete Helmholtz consiste en dos bobinas circulares de radio  $R$  y separadas por una distancia igual a su radio. Si ambas bobinas tienen un número de espiras igual a  $N$  y por ambas circula una corriente  $I$  (en el mismo sentido), se tiene que el campo magnético en el centro de las espiras es constante dentro del volumen de radio  $R$ .

El valor del campo magnético dentro de la espira viene dado por:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{8}{\sqrt{125}} \cdot \frac{N \cdot I}{R} \quad \text{ecuación 2.6}$$

## **2.2.- Flujo magnético.**

Se define flujo magnético a través de un área elemental  $d\vec{A}$  como:

$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} = \vec{B} \cdot \vec{n} dA \quad \text{ecuación 2.7}$$

El flujo magnético viene dado en Webers. Como se muestra en la figura 2.2, el flujo magnético total a través de un área finita viene dado por:

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{ecuación 2.8}$$

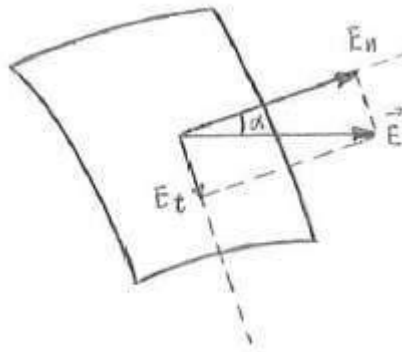


Fig. 2.2: Flujo a través de un elemento de área

### **2.3 Ley de Faraday.**

Los experimentos de Oersted, pusieron de manifiesto la existencia de un campo magnético asociado a la circulación de corriente eléctrica. Se ha observado que cuando por un conductor fluye corriente se produce un campo magnético. En 1831, tanto Michael Faraday como Joseph Henry, encontraron de forma independiente que el efecto inverso también es posible. Es decir que un campo magnético puede producir una corriente en un circuito cerrado, pero debe cumplirse la condición de que el flujo magnético de enlace sobre el circuito debe estar cambiando con el tiempo.

Los experimentos de Faraday y Henry demostraron que si el flujo magnético,  $\Phi$ , a través de un circuito varía por cualquier medio, se induce una fuerza electromotriz (fem),  $\mathcal{E}$ , cuyo valor viene dado por:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{ecuación 2.9}$$

El signo menos de la expresión está relacionado con la dirección de la fuerza electromotriz inducida, de modo que su dirección y sentido es tal, que se opone a la variación que las produce (ley de Lenz). Es decir, el sentido de la fuerza electromotriz inducida en el circuito ha de ser tal que el campo

magnético inducido (generado por la corriente inducida) contrarreste la variación de flujo magnético inicial.

## **2.4.- Campos magnéticos en medios materiales**

La teoría de Ampère era que los pronunciados efectos magnéticos de una barra de hierro ocurren cuando un gran número de imanes de tamaño atómico asociados con los átomos del hierro, se orientaban en la misma dirección de manera que sus efectos eran aditivos. La naturaleza precisa de los pequeñísimos imanes no es importante si se limita a regiones que contienen gran número de ellos. Así pues, pueden considerarse como pequeñísimos imanes o como espiras de corriente en miniatura. En cualquier caso, puede describirse mediante el momento dipolar magnético  $\vec{m}$  asociado, de modo que para caracterizar un material magnético se define imanación  $\vec{M}$ , como el momento dipolar magnético por unidad de volumen.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dv} \quad \text{ecuación 2.10}$$

La imanación tiene las dimensiones de momento dipolar magnético por unidad de volumen. Se expresa en Amperios partido metro, ( $A \cdot m^{-1}$ ), en el Sistema Internacional.

## **2.5.- Clases de materiales magnéticos.**

Existen varias clases de materiales magnéticos. Se pueden clasificar los materiales en tres categorías, paramagnéticos, diamagnéticos y ferromagnéticos, de acuerdo con su comportamiento ante un campo magnético externo. Los materiales o sustancias paramagnéticas o ferromagnéticas tienen moléculas con momentos dipolares permanentes. En los materiales paramagnéticos estos momentos no interactúan fuertemente entre sí y están normalmente orientados al azar. En presencia de un campo magnético externo,

los dipolos se alinean parcialmente en la dirección del campo, produciéndose así un incremento del mismo. Sin embargo, a temperaturas ordinarias o con campos externos normales, sólo una fracción muy pequeña de los momentos se ven alineados debido a que el movimiento térmico tiende a desordenar su orientación. El aumento del campo magnético total es, por consiguiente, muy pequeño. En el ferromagnetismo debido a una fuerte interacción entre los dipolos magnéticos vecinos de origen cuántico, los momentos magnéticos se encuentran alineados entre sí, incluso sin la presencia de un campo magnético externo. El diamagnetismo se observa en materiales cuyos átomos no poseen momentos magnéticos permanentes. Es el resultado de un momento magnético inducido de sentido opuesto al campo externo. Los dipolos inducidos debilitan así el campo magnético resultante. Este efecto se produce en todas las sustancias, pero es muy pequeño y con frecuencia resulta enmascarado por los efectos paramagnéticos o ferromagnéticos si existen momentos dipolares magnéticos permanentes.

Si se aplica un campo magnético,  $\vec{B}_{ap}$ , a un material magnético, el campo magnético total  $\vec{B}$ , puede escribirse de forma general como:

$$\vec{B} = \vec{B}_{ap} + \mu_0 \vec{M} \quad \text{ecuación 2.11}$$

En los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos,  $\vec{M}$  posee la misma dirección y sentido que  $\vec{B}_{ap}$ , en los materiales diamagnéticos,  $\vec{M}$  se opone a  $\vec{B}_{ap}$ . Para caracterizar la respuesta magnética de un material, se define la susceptibilidad magnética,  $\chi_m$ , como:

$$\vec{M} = \chi_m \left( \frac{\vec{B}_{ap}}{\mu_0} \right) \quad \text{ecuación 2.12}$$

en donde  $\chi_m$  es un número adimensional. La expresión 2.11 se transforma en:

$$\vec{B} = \vec{B}_{ap} + \mu_0 \vec{M} = \vec{B}_{ap} (1 + \chi_m) \quad \text{ecuación 2.13}$$

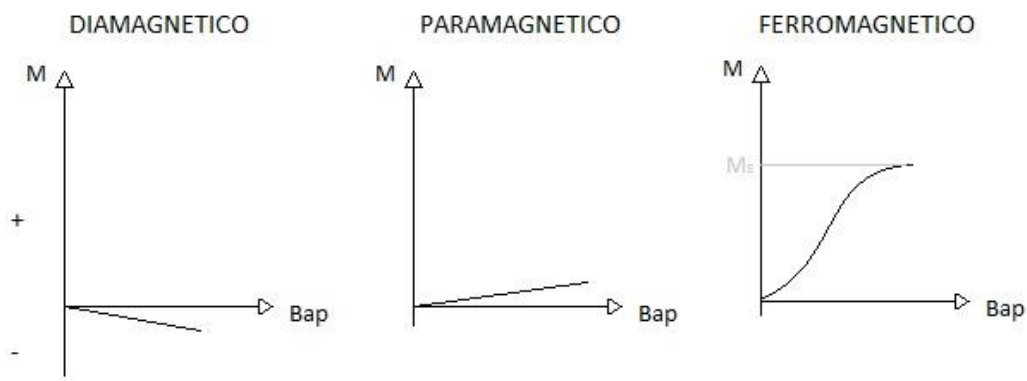


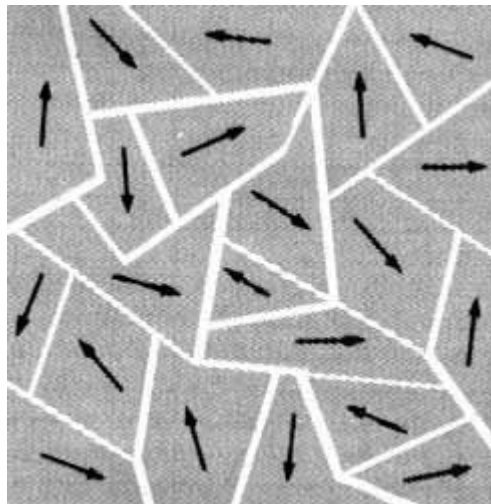
Fig. 2.3: La imanación,  $\vec{M}$ , se representa en función de  $\vec{B}_{ap}$ , para las tres clases de materiales

Para materiales diamagnéticos,  $\chi_m$  es un número pequeño negativo e independiente de la temperatura. Para materiales paramagnéticos,  $\chi_m$  es un número pequeño positivo que depende de la temperatura. En materiales ferromagnéticos,  $\chi_m$  depende de  $\vec{B}_{ap}$ , del estado previo de imanación del material y de la temperatura, pero de modo general, es mucho más grande que el valor característico de materiales diamagnéticos y paramagnéticos.

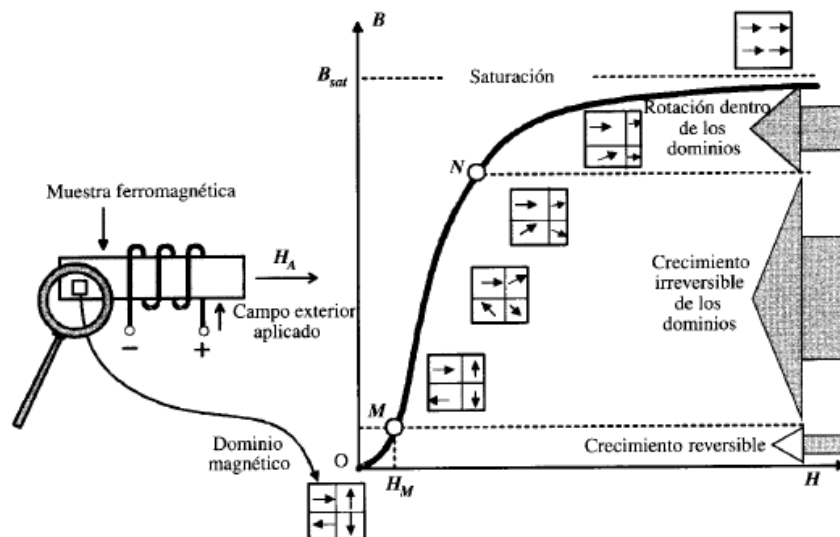
## **2.6.- Ferromagnetismo. Teoría de los dominios.**

Las materias ferromagnéticas son los elementos Fe, Ni, Co y sus aleaciones, ciertos compuesto de Mn, y ciertos elementos de tierras raras.

Presentan una imanación  $M$  grande, que a su vez produce grandes campos magnéticos internos y externos que nos son muy útiles. La existencia de un estado desimanado (imanación neta,  $M=0$ ) en la mayoría de los materiales ferromagnéticos, fue interpretada por Weis como resultado de la existencia de pequeñas regiones en el material, donde los momentos magnéticos se encuentran alineados. (Ver figura 2.4). Los dominios son pequeños, pero macroscópicos, con dimensiones del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  m o volúmenes del orden de  $10^{-9}$  a  $10^{-18}$  m<sup>3</sup>. La orientación dentro de cada dominio es espontanea, es decir, no se necesitan aplicar campos externos.



*Fig. 2.4: Estructura de dominio en material ferromagnético policristalino. Los momentos magnéticos en cada dominio se orientan espontáneamente. Sin embargo, los dominios están ordenados al azar uno respecto al otro, lo que hace que la muestra en conjunto aparezca desimánada. El campo magnético externo será por tanto, nulo.*



*Fig. 2.5: Curva de imanación del hierro*

El comportamiento de los dominios magnéticos frente a un campo magnético aplicado determina la respuesta del material (proceso de imanación). La fig. 2.5 muestra un ejemplo de curva de imanación.

## 2.7.- Ciclo de histéresis.

Se introduce una barra de un material magnético en el interior de un solenoide, cuyo eje es OZ (ver figura 2.6). El campo generado por el solenoide,  $\vec{B}_{ap}$ , viene dado en función de la corriente eléctrica que circula por sus espiras:

$$\vec{B}_{ap} = \mu_0 n I \vec{k} \quad \text{ecuación 2.14}$$

donde  $n$ , es el número de espiras por unidad de longitud y  $\vec{k}$  es un vector unitario a lo largo del eje del solenoide.

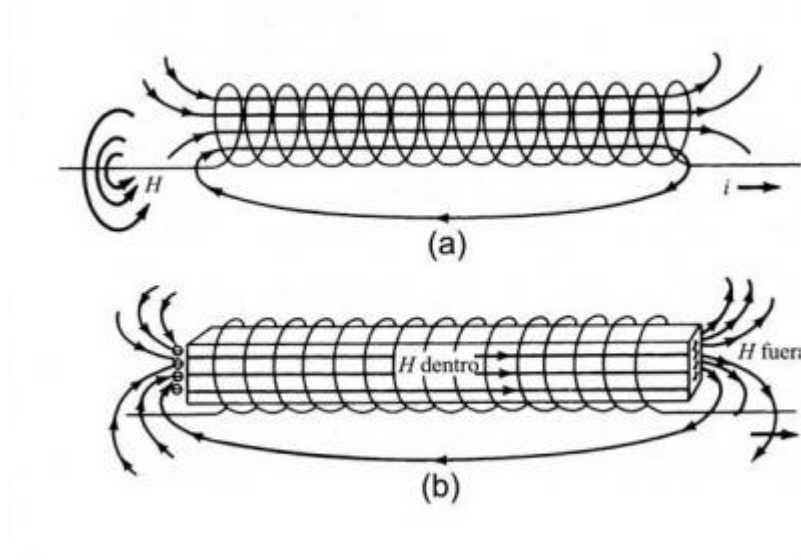


Fig.2.6: (a) Ilustración esquemática de un campo magnético creado por un solenoide, debido al paso de corriente eléctrica por el hilo; (b) Ilustración esquemática del aumento del campo magnético alrededor del solenoide cuando se introduce una barra de hierro dentro del solenoide.

Se supone que la barra y el solenoide son lo suficientemente grandes para despreciar los efectos de los extremos. El campo magnético  $\vec{B}$ , en el centro de la barra, será:

$$\vec{B} = \vec{B}_{ap} + \mu_0 \vec{M} \quad \text{ecuación 2.15}$$

Por tanto si se introduce un material ferromagnético dentro de un solenoide, el campo magnético aumentará como resultado del proceso de imanación del material.

Si se varía gradualmente y de modo cíclico la corriente que circula por el solenoide, el campo magnético total  $\vec{B}$ , presenta la evolución mostrada en la figura 2.7 (ciclo de histéresis).

Cuando la corriente se hace crecer gradualmente desde cero,  $\vec{B}$  aumenta desde cero a lo largo de la parte de la curva que empieza en el origen O y llega al punto  $P_1$ . Este aumento inicial de  $\vec{B}$  es el resultado del desplazamiento de las paredes de dominios del material, de modo que aquellas regiones con imanación paralela al campo magnético, crecen a expensas del resto. La tendencia hacia la horizontal de esta curva cerca del punto  $P_1$  indica que la imanación  $M$  se está aproximando a su valor de saturación,  $M_s$ , que se presenta cuando todos los dipolos atómicos están alineados en la dirección del campo. Por encima de la saturación,  $\vec{B}$  crece sólo porque el campo aplicado  $B_{ap} = \mu_0 \cdot n \cdot I$  crece también. Cuando  $\vec{B}_{ap}$  se hace disminuir gradualmente desde el punto  $P_1$ , no existe una disminución correspondiente de la imanación. El desplazamiento de los dominios en un material ferromagnético no es completamente reversible, y parte de la imanación permanece aún cuando  $B_{ap}$  se reduce a cero, según se indica en la figura 2.7. A este efecto se le denomina histéresis, y la curva se denomina curva de histéresis. El valor del campo magnético en el punto r cuando  $\vec{B}_{ap}$  es cero se denomina campo remanente  $\vec{B}_r$ .

Si la corriente en el solenoide se invierte ahora de modo que  $\vec{B}_{ap}$  tiene sentido opuesto, el campo magnético  $\vec{B}$  se hace cero en el punto c. La parte restante de la curva de histéresis se obtiene mediante un aumento adicional de la corriente en sentido opuesto hasta que se alcanza el punto  $P_2$ , que corresponde a la saturación en sentido opuesto, y luego haciendo disminuir la corriente hasta cero en el punto  $P_3$  y aumentando la corriente de nuevo en el sentido inicial.



Como la imanación  $\vec{M}$  depende de la historia previa del material y puede tener un valor grande, incluso cuando el campo aplicado es nulo, su relación con este no es simple. Sin embargo, si se limita a aquella parte de la curva de imanación desde el origen al punto  $P_1$  de la figura 2.7,  $\vec{M}$  y  $\vec{B}_{ap}$  son paralelos y  $\vec{M}$  es cero cuando  $\vec{B}_{ap}$  es cero. Se puede definir la susceptibilidad magnética como la ecuación 2.16

$$\vec{M} = \chi_m \left( \frac{\vec{B}_{ap}}{\mu_0} \right) \quad \text{ecuación 2.16}$$

y

$$\vec{B} = \vec{B}_{ap} + \mu_0 \vec{M} = \vec{B}_{ap} (1 + \chi_m) = \mu_0 \cdot n \cdot I (1 + \chi_m) \quad \text{ecuación 2.17}$$

con  $\mu$

$$\mu = (1 + \chi_m) \mu_0 \quad \text{ecuación 2.18}$$

que se denomina permeabilidad magnética de la sustancia. (La permeabilidad se define del mismo modo en los materiales paramagnéticos y diamagnéticos, pero como  $\chi_m$  es muy inferior a 1 en estos materiales, la permeabilidad  $\mu$  y la permeabilidad del vacío  $\mu_0$  son prácticamente iguales). La permeabilidad relativa  $\mu_r$  es un número adimensional definido por la expresión:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m = \frac{B}{B_{ap}} \quad \text{ecuación 2.19}$$

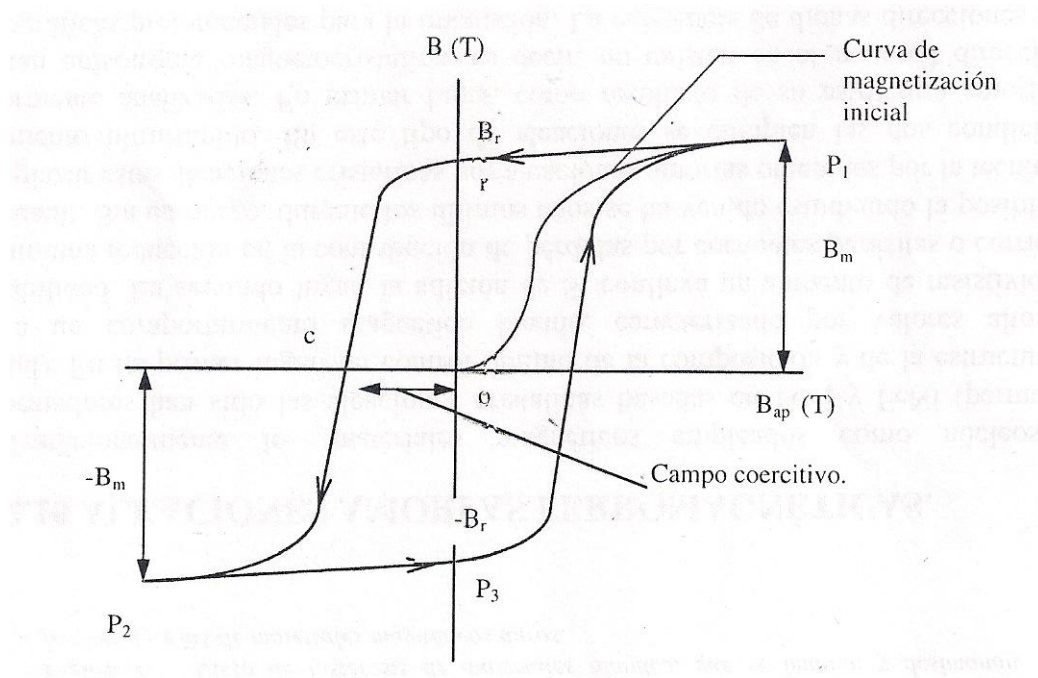


Fig.2.7: Ciclo de histéresis.

Como  $\vec{B}$  no varía linealmente con  $\vec{B}_{ap}$ , la permeabilidad relativa no es constante. El máximo valor de  $\mu_r$  tiene lugar para un valor de imanación considerablemente menor que la imanación de saturación.

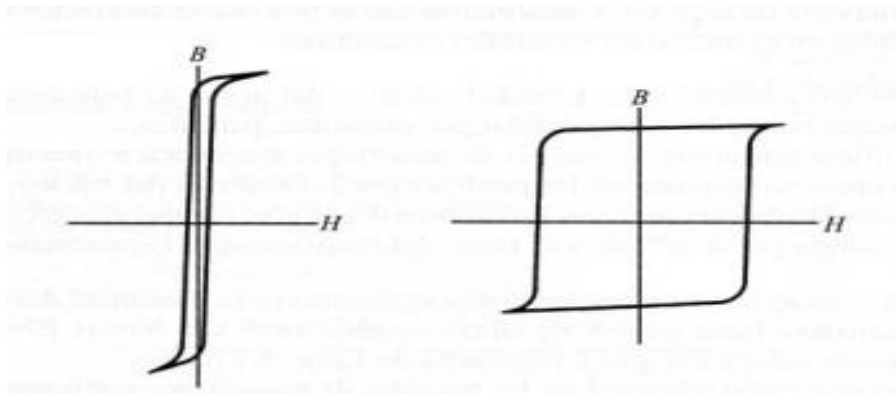
A la vista del ciclo de histéresis, el comportamiento magnético puede describirse de forma general mediante los siguientes parámetros característicos de dicha curva: trabajo de imanación, susceptibilidad magnética  $\chi_m$ , imanación remanente  $M_r$ , campo coercitivo e imanación de saturación  $M_s$ .

## **2.8.- Materiales ferromagnéticos duros y blandos.**

Desde el punto de vista de su comportamiento magnético, los materiales ferromagnéticos se pueden dividir en dos extensas clases. Los materiales “blandos” que se usan en generadores, motores y transformadores para aumentar la densidad de flujo magnético cuando circula una corriente en sus circuitos. Operando en corriente alterna estos materiales pueden cambiar su imanación rápidamente sin una pérdida grande de energía. Están

caracterizados por un ciclo de histéresis estrecho y alto de pequeña área, como se indica en la figura 2.8. Para tales materiales es deseable tener un campo coercitivo tan pequeño como sea posible. El campo remante  $B_r$  es casi cero, siendo la pérdida de energía por ciclo muy pequeña. Estos materiales tienen un valor de saturación  $B_s$  elevado, así como valores de permeabilidad,  $\mu$ , elevados. Para hacer un material blando, el movimiento de la pared de los dominios debe de hacerse tan fácil como sea posible. Los materiales que son blandos tienen una estructura uniforme, libres de inclusiones y esfuerzos locales, con los granos del cristal bien alineados y baja anisotropía magnetocristalina.

Por otro lado, parece lógico que los materiales para imanes permanentes deberán tener propiedades directamente opuestas. Los buenos imanes permanentes deben tener gran resistencia a la desimación. Por tanto, el campo coercitivo debe ser tan grande como sea posible. Tales materiales se llaman “duros”.



*Fig. 2.8: Ciclo de histéresis de materiales blandos y duros, respectivamente.*

## **2.9 Fuerza electromotriz inducida empleando materiales ferromagnéticos blandos como multiplicadores de flujo magnético**

Si disponemos de un solenoide de  $n$  espiras por unidad de longitud, por el que circula una corriente sinusoidal de amplitud  $I_0$  y frecuencia  $f$  ( $I = I_0 \sin(2\pi ft)$ ), la fuerza electromotriz inducida en un bobinado secundario coaxial con el eje del solenoide con  $N$  espiras y sección  $A$  vendrá dada por:

$$\mathcal{E} = -N \cdot S \frac{dB}{dt} = N \cdot S \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{ecuación 2.20}$$

Bajo estas condiciones, se inducirá un voltaje en el bobinado secundario de la misma frecuencia y amplitud,

$$\mathcal{E}_0 = N \cdot S \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{ecuación 2.21}$$

Si se introduce en el interior del solenoide una barra de material ferromagnético (sección  $\sim A$ ) y permeabilidad inicial  $\mu_i$ , la fuerza electromotriz inducida vendrá dada de acuerdo con la ec. 2.20 y la ec 2.17 por:

$$\mathcal{E} = (N \cdot S \cdot \mu \cdot n \cdot I_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{ecuación 2.22}$$

La ec. 2.22 es estrictamente válida en la zona lineal de la curva de histéresis del material ferromagnético (valores pequeños de  $B_{ap}$ ). Sin embargo, la respuesta no lineal del material ferromagnético da lugar, como veremos a continuación, a la aparición de armónicos de orden mayor al fundamental en el voltaje inducido en el bobinado secundario.

## **2.10 Aproximación teórica a la curva de magnetización.**

Para calcular el segundo armónico, que se induce en la bobina receptora, nos podemos valer de una aproximación polinómica. Esta aproximación vale para la parte lineal de la curva de magnetización [1]:

$$b_1(H)=a_0+a_1\cdot H+a_2\cdot H^2+a_3\cdot H^3+\dots+a_n\cdot H^n. \quad \text{ecuación 2.23}$$

siendo:

$$H=B_{ap}/\mu_0 = n\cdot I \quad \text{ecuación 2.24}$$

A partir de la aproximación polinómica de tercer orden  $B=a_1\cdot H-a_3\cdot H^3$ , en ausencia de un campo externo continuo se obtendría únicamente los armónicos impares:

$$\mathcal{E}=N\cdot S\cdot \frac{d}{dt}(a_1\cdot H-a_3\cdot H^3)=a_1\cdot \cos(\omega\cdot t)+a_3\cdot \cos(3\cdot \omega\cdot t) \quad \text{ecuación 2.25}$$

En cambio, la presencia de un campo continuo  $H_{dc}$  simultáneamente al campo alterno generado por la corriente alterna, circulando por el solenoide, daría lugar a armónicos pares en fuerza electromotriz inducida. El campo continuo desplaza la señal sinusoidal  $B$ , por lo que se acerca a la saturación del material, lo que puede producir que la fuerza electromotriz inducida se aleje de la forma sinusoidal. Entonces la densidad de flujo será [1]:

$$B(H)= a_1\cdot H_{dc}+a_1\cdot H_0\cdot \sin(\omega\cdot t)-a_3(H_{dc}+H_0\sin(\omega t))^3. \quad \text{ecuación 2.25}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{out}= & B\cdot \omega[a_1\cdot H_0-3\cdot a_3\cdot H_{dc}^2\cdot H_0-(3/4)\cdot a_3\cdot H_0]\cdot \cos(\omega t) + \\ & + 3B\cdot \omega\cdot a_3\cdot H_{dc}\cdot H_0^2\cdot \sin(2\cdot \omega\cdot t) + (3/4)B\cdot \omega\cdot a_3\cdot H_0^3\cdot \cos(3\cdot \omega\cdot t) \end{aligned} \quad \text{ecuación 2.26}$$

Y el valor del segundo armónico será:

$$\mathcal{E}_{2do\ arm} = -3 \cdot B \cdot N \cdot A \cdot \omega \cdot a_3 \cdot H_{dc} \cdot H_0^2 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) \quad \text{ecuación 2.27}$$

Se observa que el valor del segundo armónico como una aproximación lineal depende, no solo, del campo sinusoidal, sino que también es proporcional a la amplitud del campo continuo aplicado y del coeficiente polinomio  $a_3$ .

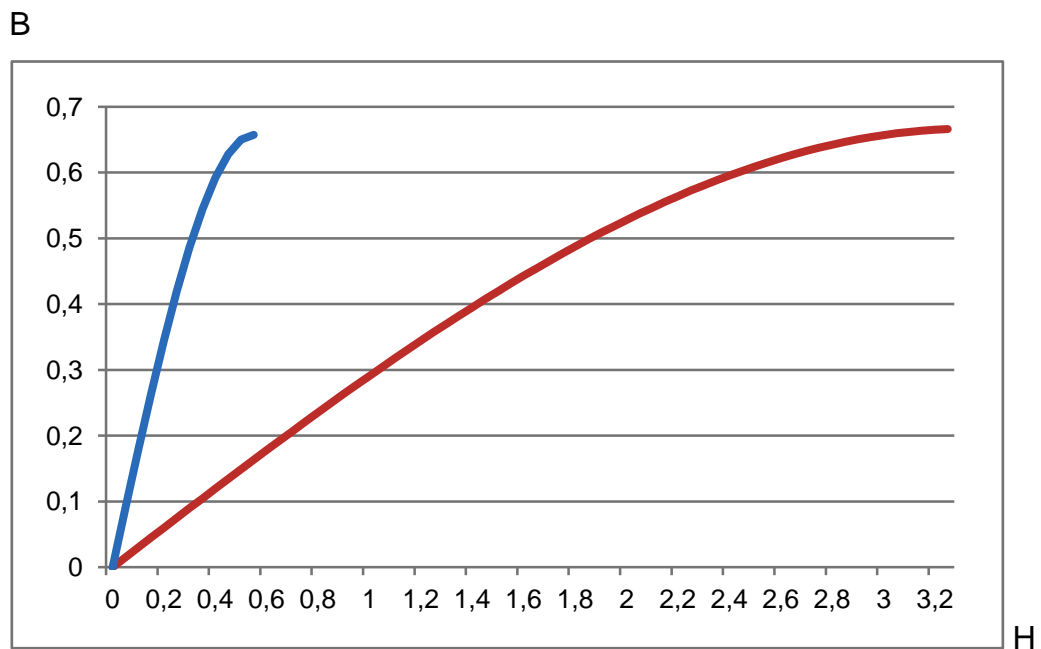


Fig. 2.9: Aproximación polinómica de dos curvas de magnetización. En azul aproximación con  $a_1=1,8$  y  $a_3=2$ . En rojo  $a_1=0,3$  y  $a_3=0,009$

La figura 2.9, muestra las curvas de imanación estimadas para dos valores de los coeficientes  $a_1$  y  $a_3$ . Dado un valor  $a_3 \gg a_1$  se obtendrá un predominio de la componente del segundo armónico frente a la componente fundamental.

## **2.11 Principio de funcionamiento de las etiquetas magnéticas armónicas:**

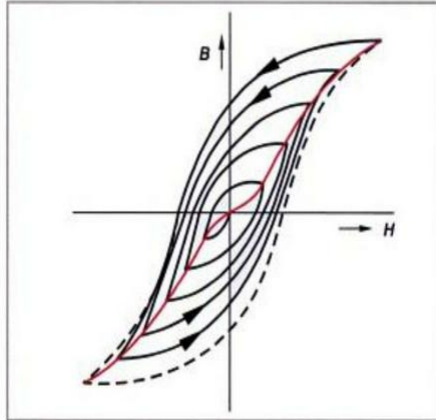
Como se ha descrito en el apartado 1.2., las etiquetas EAS armónicas están compuestas por un material ferromagnético blando (generador de armónicos bajo la excitación de un campo magnético alterno) y una cinta semi-dura que permite la activación/desactivación de la cinta mediante la imanación/desimanación de este material.

### **2.11.1 Activación/desactivación de la etiqueta:**

La activación / desactivación de la etiqueta se produce mediante el control del campo remanente producido por el material semiduro que tiene coercitividades del orden de 4 KA/m. Como se ha descrito, este material se encuentra situado junto al material blando generador de los armónicos.

Partiendo del estado desimanado (activado), para imanar la etiqueta tenemos que conseguir que sus dominios magnéticos se orienten en la misma dirección. Esto es muy sencillo, bastaría con acercar un imán, en la dirección del campo creado, y pasarla por encima de la etiqueta longitudinalmente a esta. Con ello, alcanzamos la saturación del material, y al retirar dicho imán, desaparece el campo externo, pero los dominios mantienen en parte su orientación anterior, por lo que el material conserva una imanación remanente.

La desactivación, en cambio, sería algo más compleja, ya que para desimanar el material semiduro, se aplica un campo magnético intenso, de tipo sinusoidal y de amplitud decreciente, de manera que el estado magnético del material vaya recorriendo ciclos de histéresis sucesivos, cada vez más pequeños, hasta llegar de nuevo al origen de la curva B-H, en la que  $B = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot M = 0$ .



*Fig. 2.10: Desimantado de la cinta semidura (encendido de la etiqueta)*

La etiqueta se montaría, por tanto, activada, bajo el estado desimantado del material semi-duro. La imanación de este material, producirá un campo remanente que modifica las componentes en armónicos del voltaje inducido en el sistema receptor.



# **CAPÍTULO 3**

## **-MATERIALES EMPLEADOS EN ETIQUETAS MAGNÉTICAS ARMÓNICAS-**

### **3. Materiales empleados en etiquetas magnéticas armónicas**

Como se ha descrito en apartados anteriores, las etiquetas EAS armónicas se encuentran compuestas por un elemento (cinta) ferromagnético blando (generador de armónicos) y un material semi-duro que controla el estado de activación de la etiqueta empleada en etiquetas comerciales.

#### **3.1. Aleaciones amorfas ferromagnéticas (cintas)**

Típicamente, los materiales magnéticos blandos (baja anisotropía y baja magnetoestricción), imanados a lo largo de un eje preferente, presentan ciclos de histéresis muy cuadrados. Así, las aleaciones metálicas amorfas como el Permalloy han servido ampliamente como etiquetas armónicas EAS. Diversas técnicas pueden ser usadas para mejorar la perpendicularidad del ciclo B-H de un material magnético. La forma de las etiquetas puede ser tal como para minimizar las “esquinas” de la curva y su redondez. Por este motivo se suelen emplear las cintas delgadas y estrechas. Además, el material puede ser recocido en un campo longitudinal para hacerlo más cuadrado.

Desafortunadamente, la alta permeabilidad de los materiales magnéticos es una característica extremadamente sensible a la elaboración y manipulación. Esto es especialmente crítico en materiales como el Permalloy, donde la respuesta magnética se puede degradar fácilmente por la deformación plástica. Cuando se utiliza este material en etiquetas EAS debe ir envasado de forma segura y protegida contra tensiones de manipulación. Su límite de elasticidad es de  $10^8 \text{ N/m}^2$ .

Otras aleaciones amorfas, tales como Metglas 2705 M ( $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ ) aunque también su respuesta magnética es susceptible por deformación plástica, tiene límites de elasticidad del orden de  $7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , por lo tanto es menos propenso que el Permalloy a la pérdida de permeabilidad por deformación plástica. Así, las aleaciones amorfas se pueden utilizar para etiquetas EAS en una mayor variedad de situaciones.

Generalmente, una aleación semidura, tal como Vicalloy, Arnokrome o Crovac (con coercitividades del orden de 50 a 100 Oe) puede hacer la función de interruptor al ser colocado junto al material magnético blando. Mientras la aleación semidura está desimanada, no se aplica ningún campo neto al elemento blando, por lo que la etiqueta esta activa (“ON”), es decir, que responde a  $H(t)$  con un rico contenido armónico característico. Si el material semiduro es expuesto a un alto campo magnético, y dejándolo en su estado remanente, su campo remanente de unos pocos Oe, influye sobre el material blando adyacente, saturándolo, y por lo tanto, anulando su aporte armónico, o apagando la etiqueta. En este caso, el material blando alcanza su estado de saturación, donde muy poca señal es detectada a altas frecuencias. Por tanto, el material blando es la parte activa de la etiqueta armónica EAS; y el material semiduro es el interruptor para activar/desactivar de dicha etiqueta EAS [2].

Como ya hemos visto, este tipo de etiqueta está formado por dos cintas, una cinta más larga y blanda (ver fig. 1), que es la encargada de la generación de armónicos; a veces vienen dos cintas de este tipo, para aumentar sus efectos. La otra cinta, más corta y dura, es la encargada de activar/desactivar la etiqueta en función de su estado (desimanado o imanado).

La cinta blanda, con valores típicos de longitud de 4 cm y anchura de 0,5 cm) es una cinta de un material amorfo, magnéticamente blando, con valores de saturación  $B_s$  y permeabilidad elevados. En las etiquetas EAS armónicas comerciales se emplean aleaciones comerciales no magnetostrictivas como VITROVAC 6025 ( $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{Si}_{16}\text{B}_{10}$ ) o METGLASS 2705 ( $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{12}\text{Si}_{12}$ ). En un primer lugar, un control óptimo de la composición y de la estructura amorfa da lugar a un comportamiento magnético blando, caracterizado por valores altos de permeabilidad. En un segundo lugar, la adición de Si conlleva un aumento de resistividad y por tanto una reducción en la contribución de perdidas por corriente de parasitas o de Foucault. Estas aleaciones se obtienen en estado amorfo[3].

La técnica empleada para la obtención de las aleaciones amorfas ferromagnéticas en este tipo de etiquetas EAS es la técnica de solidificación ultrarrápida “melt-spinning”. Esta técnica, consiste esencialmente en la

inyección de un chorro de aleación fundida sobre la superficie de una rueda de cobre que gira a elevada velocidad. La superficie de la rueda de cobre actúa como sumidero de calor, solidificándose el líquido a una velocidad determinada.

La obtención de vidrios metálicos, aleaciones metálicas amorfas con una proporción de metales (70-80 %) y metaloides (20-30 %), requiere un ritmo de enfriamiento de la fase líquida del orden de  $10^6$  grados por segundo, por lo que no es posible encontrarlos en la naturaleza. La técnica de fabricación de aleaciones amorfas ferromagnéticas no se desarrolló hasta la década de los sesenta, momento en el cual se pudo conseguir ritmos de enfriamiento del orden citado, cuyas propiedades abren nuevos campos a la investigación tanto básica como aplicada.

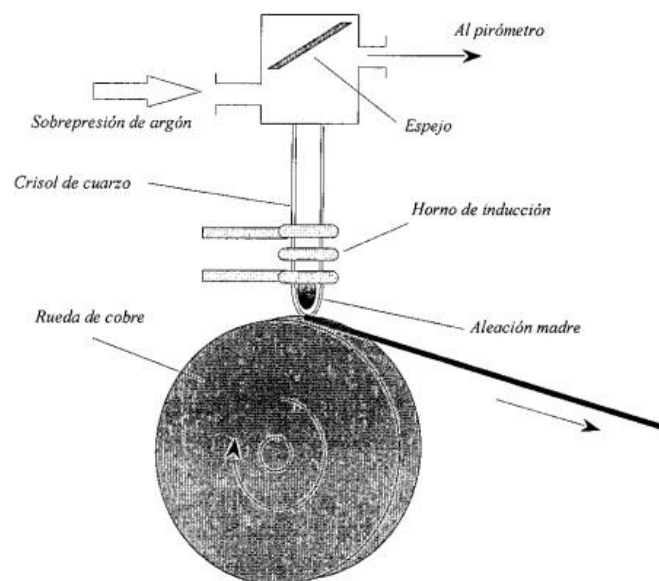
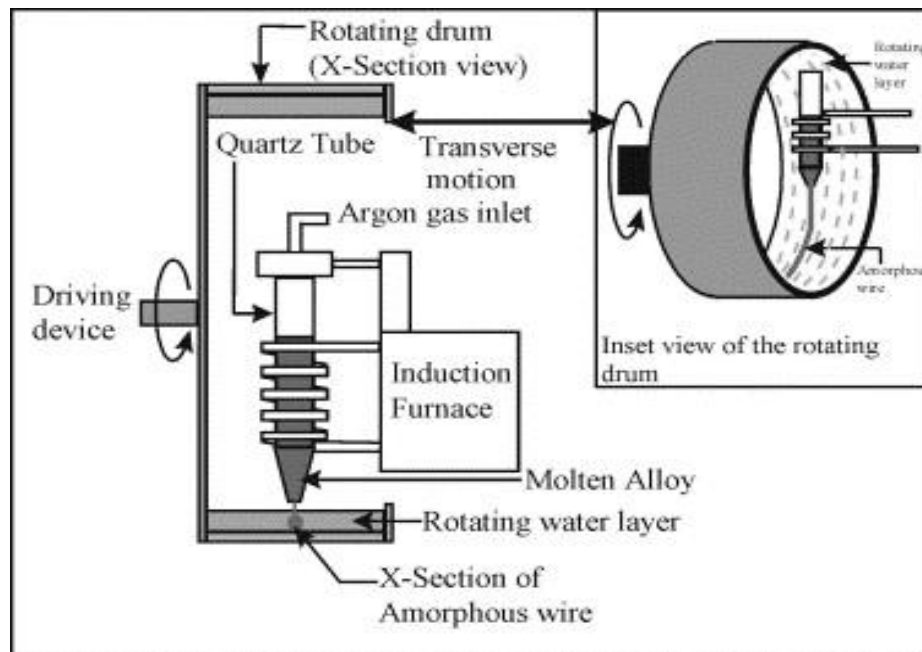


Fig. 3.1: Esquema de la técnica de solidificación ultrarrápida, "melt-spinning".

### **3.2. Hilos amorfos ferromagnéticos.**

Mediante la técnica de “melt-spinning” no solo es posible obtener aleaciones amorfas en forma de cinta, sino también aleaciones de sección circular. Estos hilos altamente magnetostrictivos presentan un comportamiento magnético característico, consecuencia directa del proceso de fabricación.

El método más extendido de producción de hilos amorfos se denomina “in-rotating-water quenching”, el cual consiste en inyectar la aleación fundida en un flujo de agua rotando a gran velocidad. Este método es bastante eficaz y es empleado para la producción a gran escala de hilos amorfos [7].



*Fig. 3.2: Esquema del dispositivo experimental para la fabricación de hilos amorfos mediante la técnica “in-rotating-water quenching” [7]: a) vista frontal, b) vista transversal*

Los hilos amorfos, en particular los altamente magnetostrictivos, ricos en Fe, presentan un peculiar comportamiento magnético muy diferente del observado en aleaciones amorfas de igual composición en forma de cinta. El proceso de imanación de este tipo de hilos, se caracteriza por la aparición en estado a bajo campo de un gran y único salto de Barkhausen, dando lugar a

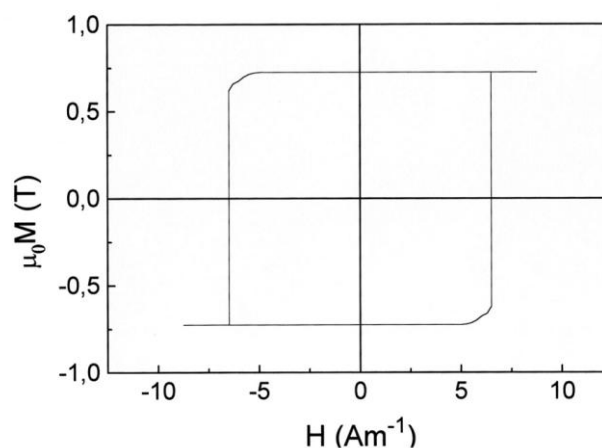
ciclos de histéresis rectangulares. Este comportamiento (biestable) ha sido interpretado como consecuencia de la anisotropía magnetoelástica, producto de la interacción entre su alta constante de magnetostricción y las tensiones internas “congeladas” durante el proceso de fabricación [7].

Los ciclos de histéresis axiales de los hilos altamente magnetostrictivos puede dividirse en tres etapas:

**1ª)** Para campos inferiores a un determinado valor umbral, la imanación experimenta únicamente variaciones reversibles.

**2ª)** Para un determinado valor de campo, denominado campo crítico (switching field),  $H$ , la imanación presenta un gran salto o discontinuidad de Barkhausen, invirtiéndose bruscamente su sentido.

**3ª)** Para campos aplicados superiores se observa una variación reversible de la imanación hasta alcanzar el estado saturado.



*Fig.3.3: Ciclo de histéresis de un hilo rico en Fe. [8]*

Este particular ciclo de histéresis da lugar, como veremos a continuación, a una respuesta magnética óptima para ser aplicada en etiquetas EAS armónicas.

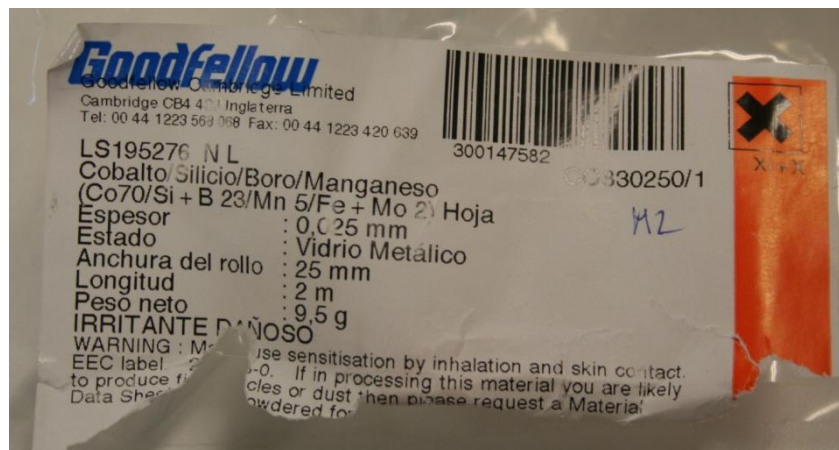
# **CAPÍTULO 4**

## **-MATERIALES E INSTRUMENTAL EMPLEADO.-**

## **4. MATERIALES E INSTRUMENTAL EMPLEADO**

### **4.1 Materiales empleados:**

- Etiqueta magnética antirrobo EAS comercial.
  - Cinta rica en Cobalto distribuida por Goodfellow.
- Composición: Co70/Si + B 23/Mn5/Fe + Mo 2



*Fig.4.1: Referencia de la cinta rica en Co*

Información técnica de la cinta de Cobalto/Silicio/Boro/Manganeso [9]:

#### **Propiedades físicas:**

Densidad: 7,6 g cm<sup>-3</sup>

#### **Propiedades magnéticas:**

Coercitividad – Moldeado <1 A/m

Densidad de flujo de saturación: 0,8 Teslas

Magnetostricción de saturación (x10<sup>-6</sup>) < 0,3

Relación de remanencia (B<sub>r</sub>/B<sub>s</sub>): 0,7-0,95

Temperatura de Curie: 350°C



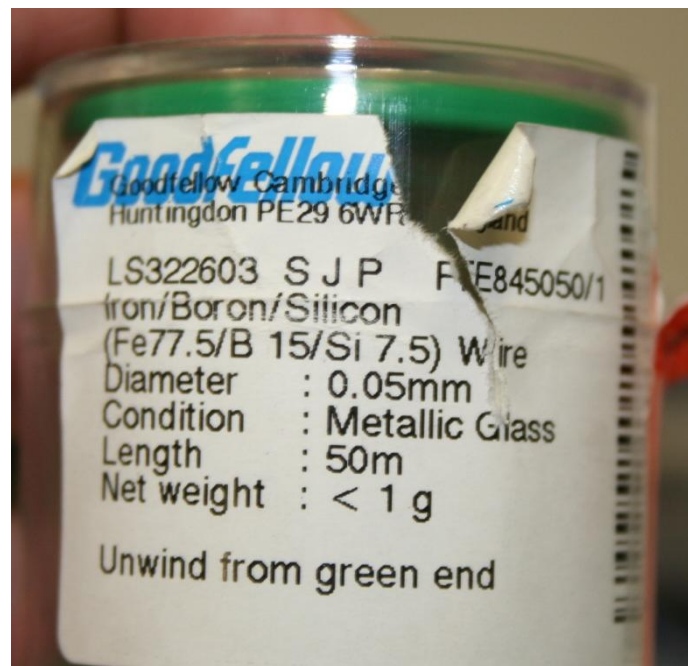
Propiedades mecánicas:

Dureza Vickers: 130 Kgf/mm<sup>2</sup>

Resistencia a la compresión: 80-120 MPa

- Hilos amorfo biestable proporcionado por la empresa Goodfellow.

Composición: Fe77,5/B15/Si7,5. Diámetro: 0,125mm



*Fig.4.2: Referencias de un hilo rico en Fe igual que el empleado, a excepción del diámetro.*

Información técnica del hilo Hierro/Boro/Silicio [9]

Descripción:

Vidrio metálico (aleación vidriosa) o metal amorfo. Se emplea en aplicaciones magnéticas blandas, soldadura, recubrimientos y fibras de reforzamiento.

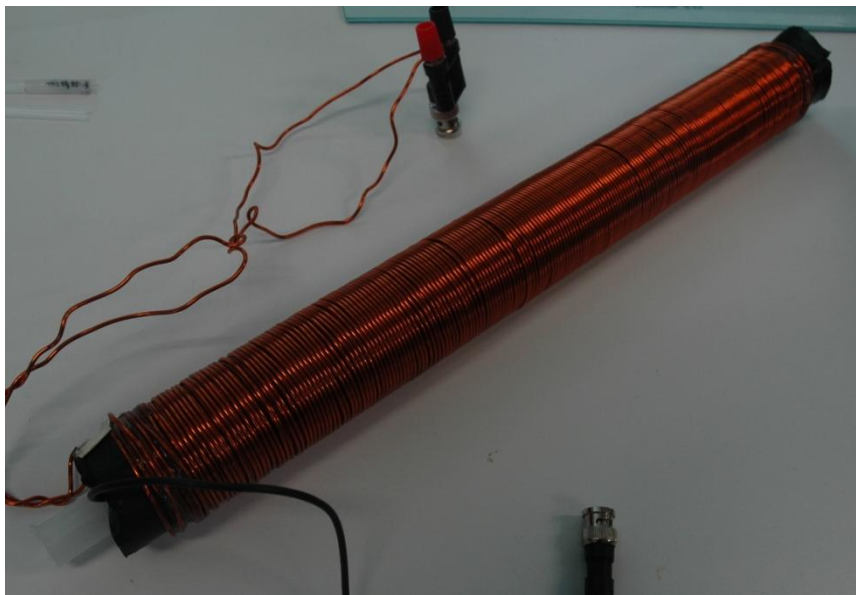
Propiedades magnéticas:

Temperatura de Curie: 422°C

Propiedades mecánicas:

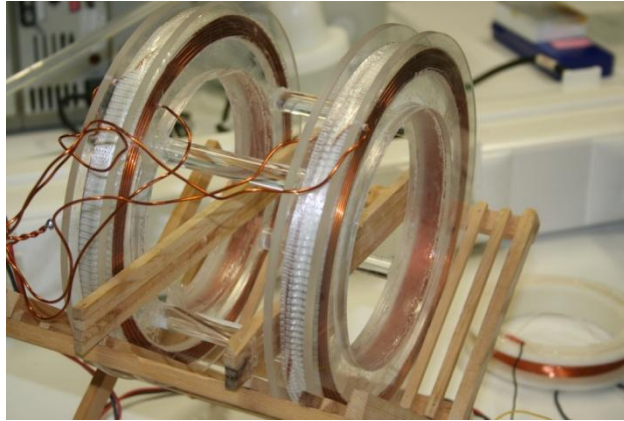
Dureza Vickers: 124 kgf/mm<sup>2</sup>

- Cinta de material magnético semi-duro. Esta cinta extraída de una etiqueta antirrobo EAS comercial, se empleara para la activación y desactivación de la etiqueta.
- Solenoide. Crea un campo constante en su interior por el paso de una corriente eléctrica



*Fig.4.3: Solenoide*

- Carretes Helmholtz. Su función es la de crear un campo constante en su interior, para simular la zona de paso de los sistemas convencionales, en donde se aplica un campo alterno, que hará reaccionar la etiqueta de una forma diferente a como lo haría cualquier otro tipo de material.



*Fig. 4.4: Carrete Helmholtz*

- Bobina larga (1). Bobina empleada para acceder al interior del solenoide.  
Resistencia: 85,5  $\Omega$ .

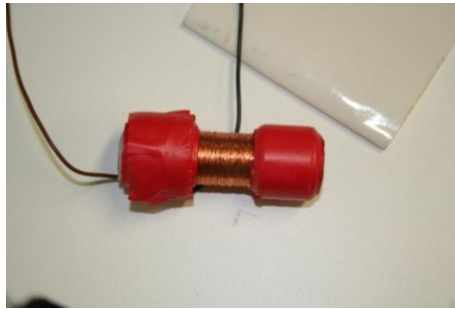


*Fig. 4.5: Bobina larga (1)*

- Bobinas cortas (2). Bobinas empleadas para caracterizar los diferentes materiales blandos. Resistencia: 40,2  $\Omega$  y 80,4  $\Omega$  cuando son dos bobinas en serie. Se emplearan dos bobinas en serie-oposición para eliminar la señal inducida procedente del campo generado por la circulación de corriente en el solenoide o en los carretes Helmholtz. De acuerdo con la ecuación 2.20 la fuerza electromotriz inducida en este caso vendrá dada por:

$$\mathcal{E} = N S \mu_0 \frac{dM}{dt}$$

ecuación 4.1



*Fig. 4.6: Una bobina corta (2). Cuando se emplean dos, ambas son idénticas en número de vueltas, tamaño y resistencia.*

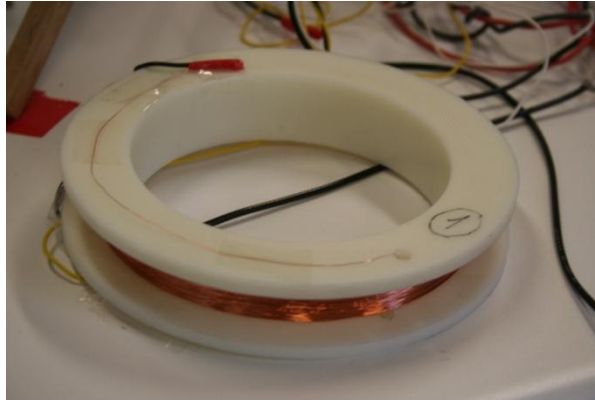
- Bobina plana (3). Su función es la misma que la de la bobina corta, pero al adaptarse mejor a la geometría de las cintas, reduce la inducción del campo magnético en el vacío. Resistencia:  $27,5 \, \Omega$  y  $52,4 \, \Omega$  en el caso de ser dos bobinas en serie.



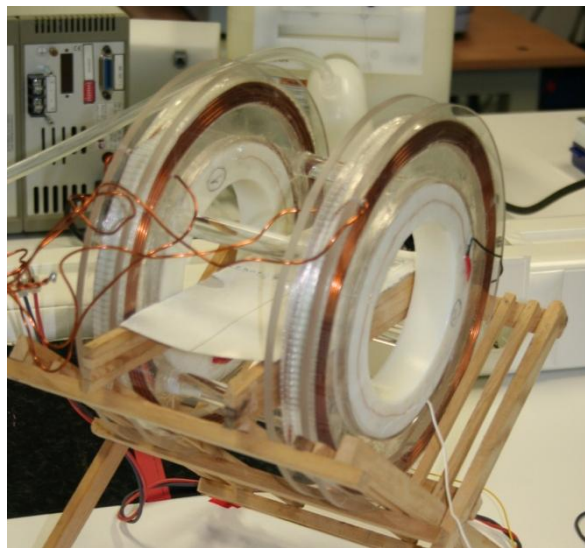
*Fig. 4.7: Bobina plana (3)*

- Bobinas detectoras (4) (mecanizadas industrialmente): Se utiliza como bobinas receptoras a distancia. Dada su geometría, dado que su diámetro máximo es unos milímetros inferior al diámetro mínimo del carrete Helmholtz, estas bobinas pueden ir ubicadas dentro del carrete Helmholtz, como muestra la fig. 4.9, simulando los sistemas de detección EAS comerciales.

Resistencia de las dos bobinas en serie más la sonda =  $100,9 \, \Omega$



*Fig. 4.8: Bobina detectora*



*Fig.4.9: Bobinas detectoras empleadas en el sistema Helmholtz.*

- Imán (Ferrita). Con la que imantaremos el material semi-duro para desactivar la etiqueta.

## **4.2.- Equipos empleados:**

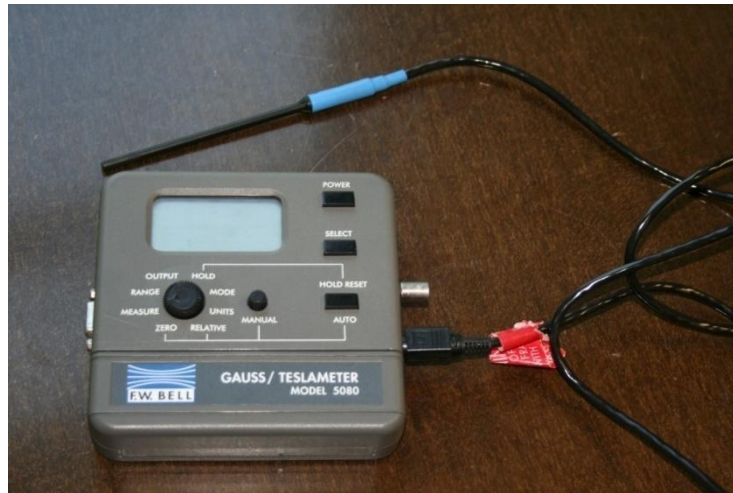
- Fuente de continua. Con ella aplicamos una corriente continua a los carretes Helmholtz para caracterizar su recta campo-corriente. Modelo: ET System electronic GmbH DC – source and load LAB/SL



Fig. 4.10: Fuente de continua

- Gaussómetro digital. Con él, mediremos los campos de continua inducidos por la corriente continua al circular por el carrete Helmholtz. Además se empleará para definir el campo de continua que se aplica con el generador de funciones (modo Offset). Modelo: F W Bell model 5080.





*Fig. 4.11: Gaussómetro*

- Generador de funciones. Su función es crear la señal sinusoidal alterna que nos generara el campo alterno de excitación. Modelo: Stanford Reseach Systems model DS345.



*Fig. 4.12: Generador de funciones*

- Amplificador. Para amplificar la señal obtenida del generador de funciones. Modelo: LH 522 61.



*Fig. 4.13: Amplificador*

- Osciloscopio digital. Su función es medir cuanta corriente estamos aplicando con el conjunto generador de señales y amplificador. Además usaremos su función FFT (transformada de Fourier) para ver la ganancia de los armónicos. Modelo: Tektronix TDS 1012.



*Fig. 4.14: Osciloscopio digital*

- Lock-in. La utilidad de este aparato de medida será la de medir la tensión inducida para cada armónico. Modelo: Stanford Research Systems model SR830 DSP Lock-in Amplifier.



*Fig. 4.15: Lock-in*

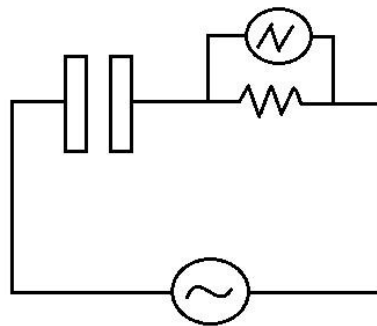


# **CAPÍTULO 5**

## **-ESTUDIOS REALIZADOS-**

## 5 Estudios realizados.

Para realizar los estudios, principalmente se emplea un carrito Helmholtz, salvo en el primer ensayo con etiquetas comerciales donde se empleo un solenoide, los cuales están alimentados por un conjunto generador-amplificador. Además se empleará un sistema de bobinas descritas en el anterior apartado para mejorar la fuerza electromotriz inducida y su componente en armónicos. Este voltaje inducido y su componente en armónicos se analizarán con un osciloscopio o en un amplificador lock-in.



*Fig. 5.1: Montaje carrito Helmholtz + conjunto alimentación + resistencia patrón + osciloscopio*

En el caso de osciloscopio se empleara la función FFT. La relación entre las amplitudes de los diferentes armónicos vendrá dada en decibelio, definido como:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (P_S/P_E) \quad \text{ecuación 5.1}$$

En donde  $P_E$  es la potencia de entrada al osciloscopio, y  $P_S$  la potencia de salida del mismo.

Se empleara una resistencia patrón  $R=1\Omega$  para caracterizar, a través de la caída de potencial entre sus extremos,  $V_{pp}$ , la corriente que circula por el circuito (solenoides/carretes Helmholtz).

Dado que la resistencia patrón es de  $1\Omega$  y  $V_{R_{pp}} = I_{pp} \cdot R_p$  obtenemos que la medida de tensión dada por el osciloscopio será numéricamente igual a la corriente que atraviesa las bobinas generadoras de campo.

## 5.1 Caracterización de los campos creados por el solenoide y el carrete Helmholtz

El primer proceso de todos es calcular el campo que crea el solenoide y las bobinas Helmholtz en función de la corriente que circula por ellos. Para ello, colocaremos la sonda Hall en el interior del solenoide o en el punto central de los carretes Helmholtz y procedemos a medir el campo magnético generado en función de la corriente que circula por sus espiras.

Mediante la fuente de continua, hacemos circular una corriente de valor creciente hasta los 2 A por ambos sistemas generadores de campo homogéneo.

Por tanto, las curvas de calibración para el solenoide y los carretes Helmholtz serán, respectivamente,  $B=7,25I$  y  $B=13,5I$ , estando B en Gauss e I en Amperios.

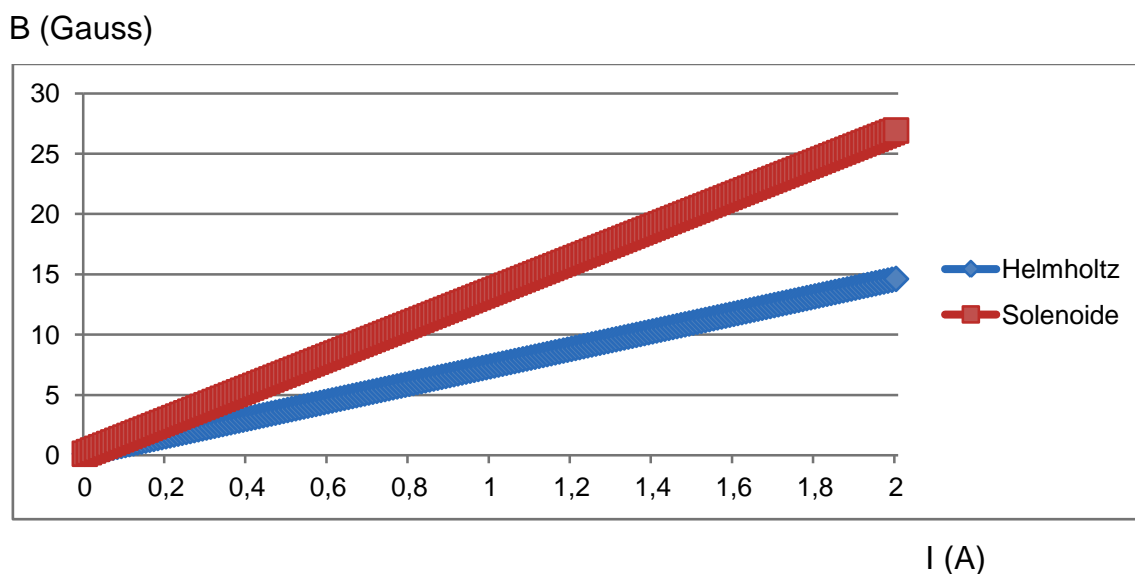
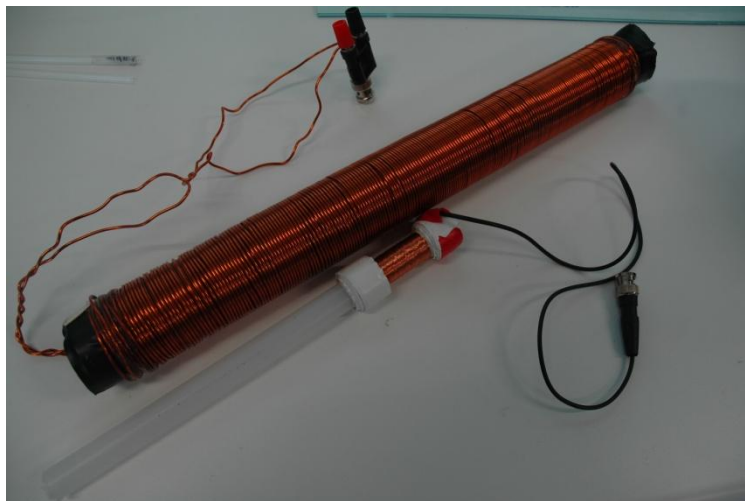


Fig.5.2: Rectas ajustadas del campo inducido en función de la corriente que circula

## **5.2. Estudio de etiqueta armónica antirrobo EAS, comercial.**

En este apartado se va a analizar el comportamiento de una etiqueta armónica EAS. Tras activar la etiqueta sometiéndola a un campo alterno intenso de amplitud decreciente, como ya se ha explicado anteriormente en el apartado 2.11.1, procedemos a analizar su componente armónica.

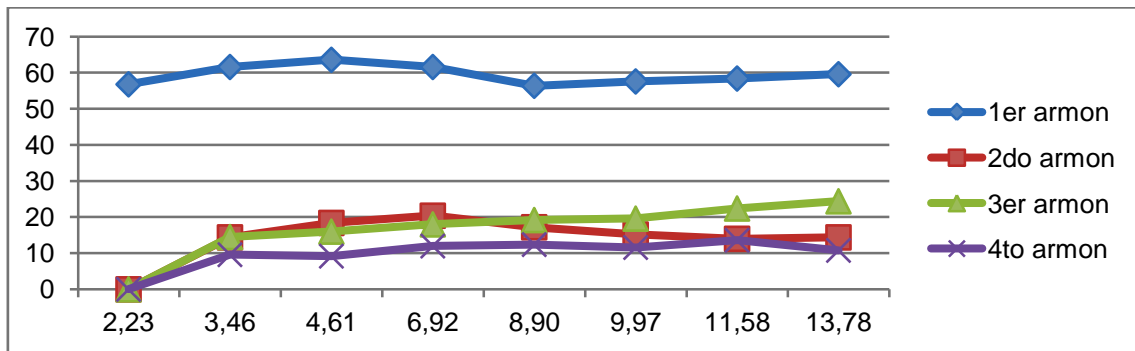
Para ello, se emplea un solenoide, y un único secundario. A continuación, introducimos la etiqueta en la bobina secundaria (1), a cuyos bornes conectamos el osciloscopio digital. Tras introducir dicha bobina larga, con la etiqueta en su interior, en el solenoide, lo suficiente como para asegurar que el campo en su interior sea constante.



*Fig.5.3: La etiqueta a estudiar se introduce en la bobina larga (en la zona del devanado), y esta bobina secundaria se introduce en el interior del solenoide por el cual circula corriente alterna.*

La fig. 5.4 muestra la evolución de la amplitud de los cuatro primeros armónicos en función del campo aplicado ( $f=500\text{Hz}$ ). Como puede observarse, el primer armónico domina el espectro frecuencial de la etiqueta comercial.

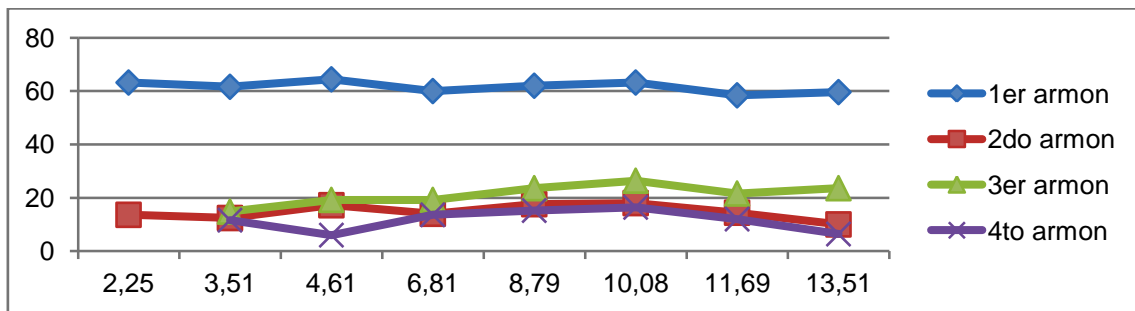
dB



Gauss

Fig. 5.4: Evolución de los armónicos con la amplitud del campo magnético aplicado (frecuencia =500Hz)

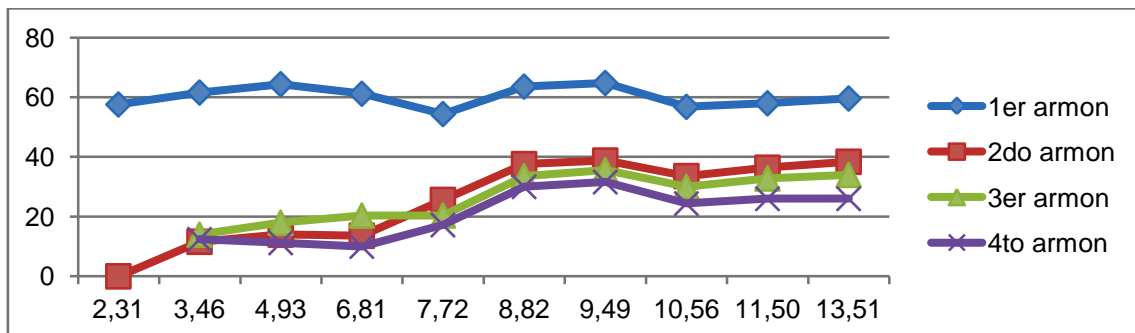
dB



Gauss

Fig. 5.5: Evolución de los armónicos con la amplitud del campo magnético aplicado (frecuencia =1kHz)

dB



Gauss

Fig. 5.6: Evolución de los armónicos con la amplitud del campo magnético aplicado (frecuencia =5kHz)

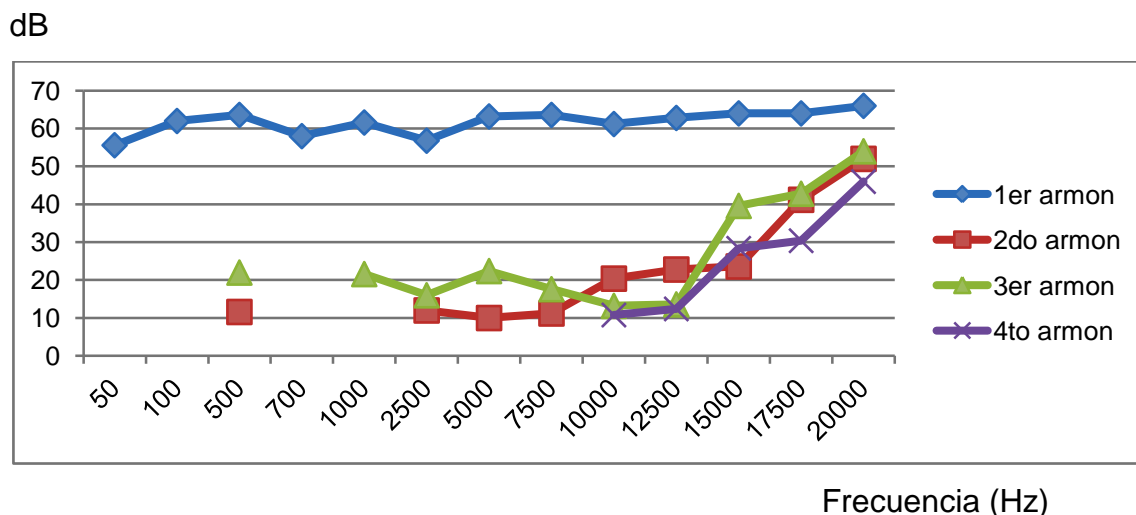


Fig. 5.7: Análisis en frecuencia de la etiqueta comercial en solenoide excitado a 9,5 Gauss, y con bobina receptora 1 (larga)

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la respuesta en función de B para frecuencias de 1kHz y 5kHz. Como puede observarse, la contribución de armónicos superiores (2º al 4º) aumenta para amplitudes de campo superiores a 9 Gauss a una frecuencia de 5kHz. Este mismo comportamiento (aumento de los armónicos de orden superior con la frecuencia) puede detectarse en la fig. 5.7, donde se observa para un campo de  $B_{ap}=9,5\text{Gauss}$  un claro aumento de armónicos a partir de 10 kHz.

A continuación, repetimos dicho estudio, pero para mayor similitud con un sistema real, la generación del campo alterno vendrá dada por un carrete Helmholtz, y como bobina receptora la bobina 2. Al secundario se le introduce la etiqueta y se coloca en el centro del eje que forman las bobinas que componen el carrete Helmholtz, longitudinalmente a este (ver fig. 5.8), y se conecta al osciloscopio.

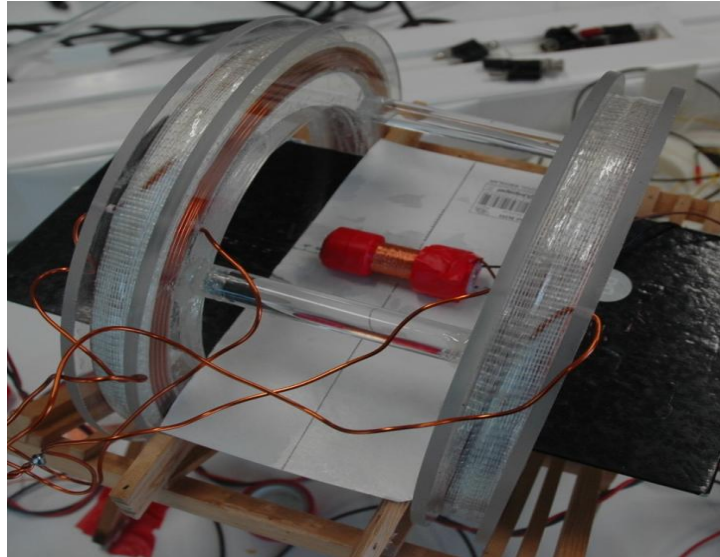


Fig.5.8: Un secundario corto (2) concéntrico al carrete Helmholtz.

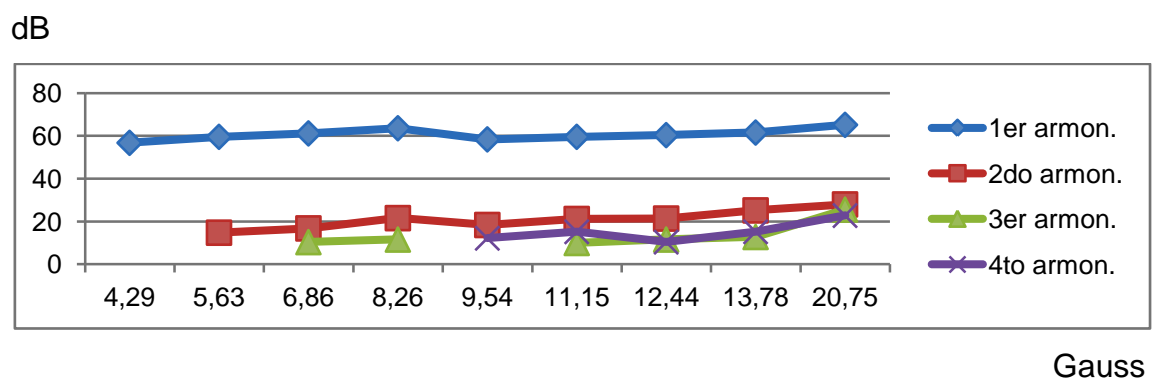


Fig. 5.9: Ganancia armónica de una etiqueta comercial, excitada en un carrete Helmholtz a 500 Hz, y con bobina receptora (2)

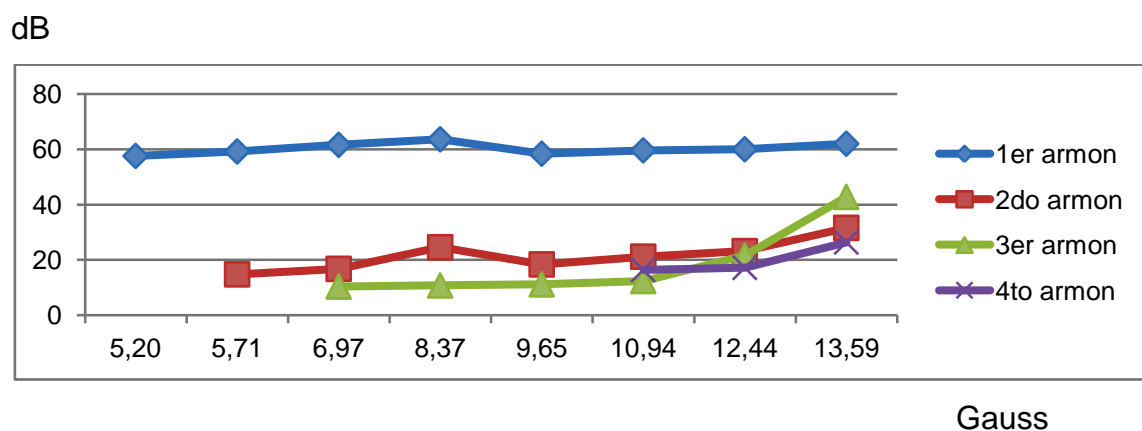


Fig. 5.4: Ganancia armónica de una etiqueta comercial, excitada en un carrete Helmholtz a 1 KHz, y con bobina receptora (2)

Se obtienen resultados similares, es decir, un dominio del armónico fundamental en el intervalo de campos magnéticos aplicados.

### **5.3 Estudio comparativo del empleo de aleaciones amorfas en etiquetas antirrobo magnéticas.**

En este apartado se incluirán los diferentes ensayos realizados, tanto para la cinta rica en Co, como para el hilo ferromagnético.

#### **5.3.1 Comportamiento de los materiales en función de la frecuencia**

Para llevar a cabo el presente ensayo, y con el fin medir los cinco primeros armónicos generados por los materiales magnéticos blandos, se empleara el sistema de carretes Helmholtz para la generación del campo magnético

Comenzamos el estudio introduciendo en el interior de la bobina 3 el material rico en Co, en forma de cinta, con la cual veremos la respuesta en armónicos, de dicho material cuando la frecuencia de excitación es de 500Hz y 1KHz.



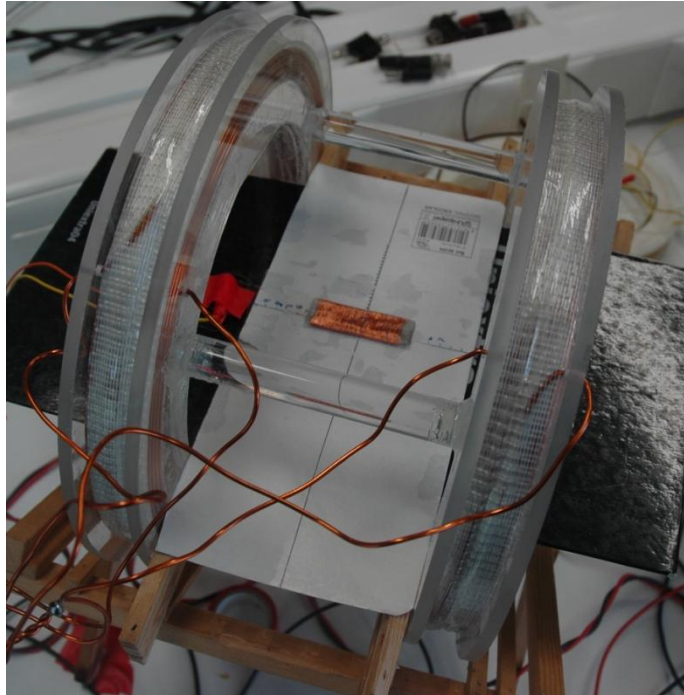
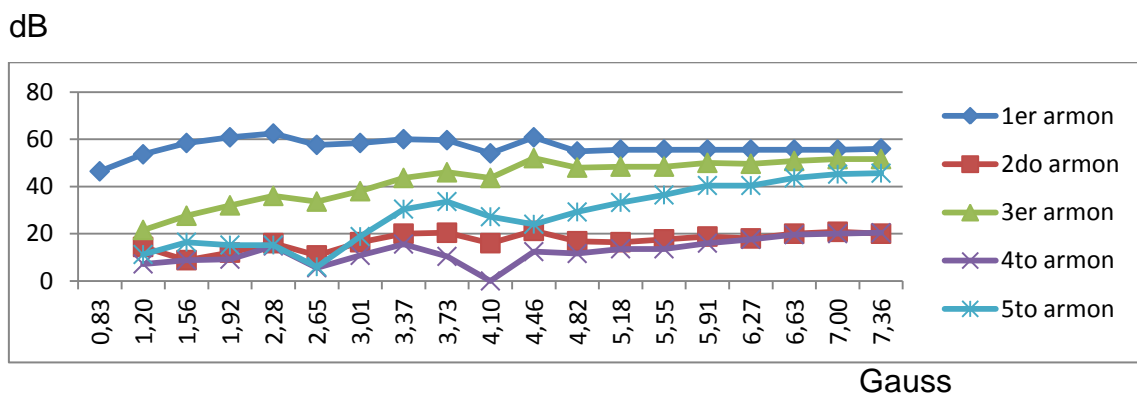


Fig. 5.11: Ensayo con una bobina plana (3) en el carrito Helmholtz



Gráfica 5.12: cinta rica en Co en bobina plana (3) a 500Hz. Ganancia en armónicos

Como puede observarse en la fig. 5.12, la cinta empleada presenta una mayor componente en armónicos que la etiqueta comercial (fig. 5.9)

Además, como era de esperar (ver apartado 2.10), en ausencia de campo magnético externo, los armónicos impares dominan la respuesta en función del campo magnético aplicado.

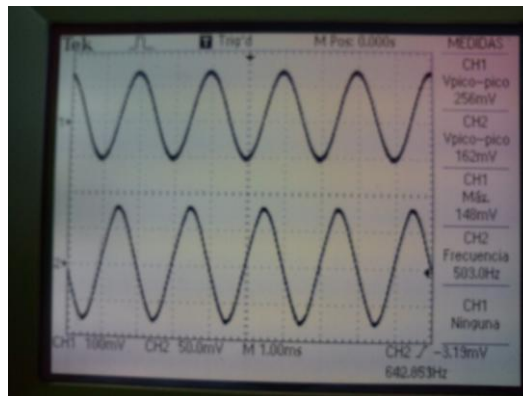


Figura 5.13: muestra una captura del osciloscopio, la señal superior la caída de potencial entre los extremos de la resistencia patrón ( $R_p$ ) y por tanto proporcional a la corriente que circula por los carretes Helmholtz. La señal inferior a la fuerza electromotriz inducida (voltaje) en la bobina plana (3) encontrándose la cinta rica en Co en su interior

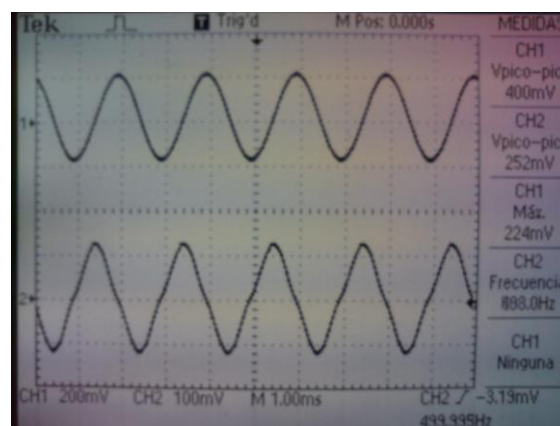


Figura 5.14: muestra una captura del osciloscopio, la señal superior es la onda sinusoidal de excitación a 500Hz, la cual crea un campo de 3,01 Gauss, mientras que la señal inferior es la lectura de la bobina de recogida, la cual comienza a perder la forma sinusoidal, dado que el  $B_{sat}$  de la cinta rica en Co es muy próximo al campo al cual está sometido el material.

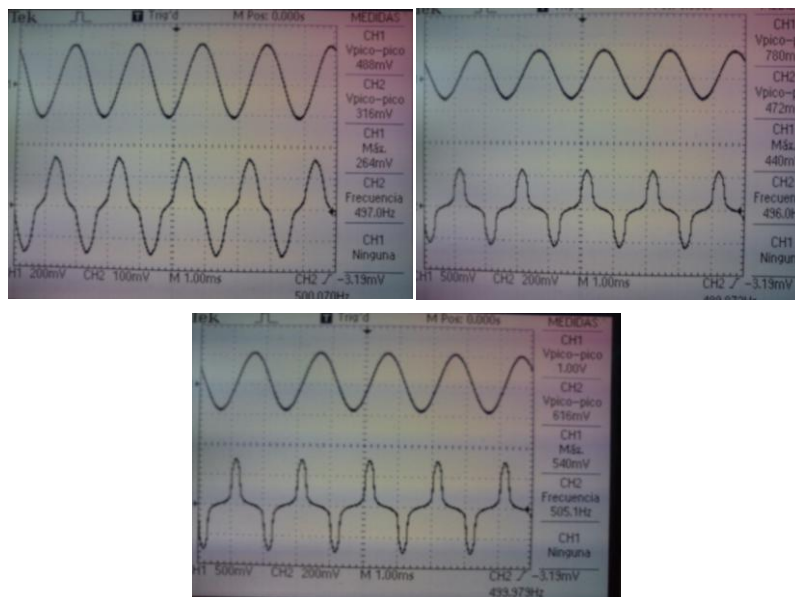


Figura 5.15: Las figuras muestran la deformación que sufre la tensión inducida en el devanado de recogida en función de un campo de excitación creciente el cual tiende a saturar la cinta rica en Co. La imagen superior izquierda muestra una incipiente saturación a un Bap de excitación de 2,4 Gauss. En las siguientes imágenes las partes, se aprecia como cada vez la señal tiene mas parte plana, lo cual se debe a que una mayor parte de la onda de excitación alcanza la saturación, no mostrando variación de flujo respecto del tiempo en esa zona, y por lo tanto se anula.

Como muestran las figuras 5.13 a 5.15 la fuerza electromotriz inducida muestra las características típicas de la curva de imanación del material al ir aumentando la amplitud del campo magnético generado por los carretes Helmholtz.

Lo que muestra el presente ensayo, y dado que las etiquetas comerciales están fabricadas de materiales similares, es que la cinta rica en Co presenta un comportamiento magnético óptimo. A partir de los 2,65 Gauss, se ve un aumento de los armónicos, zona en la cual la señal inducida en la bobina receptora comienza a perder su forma sinusoidal, por encontrarse una pequeña parte de la onda en la zona de saturación.

Realizando el mismo ensayo con el hilo rico en Fe obtenemos las siguientes ganancias en función del campo aplicado:

dB

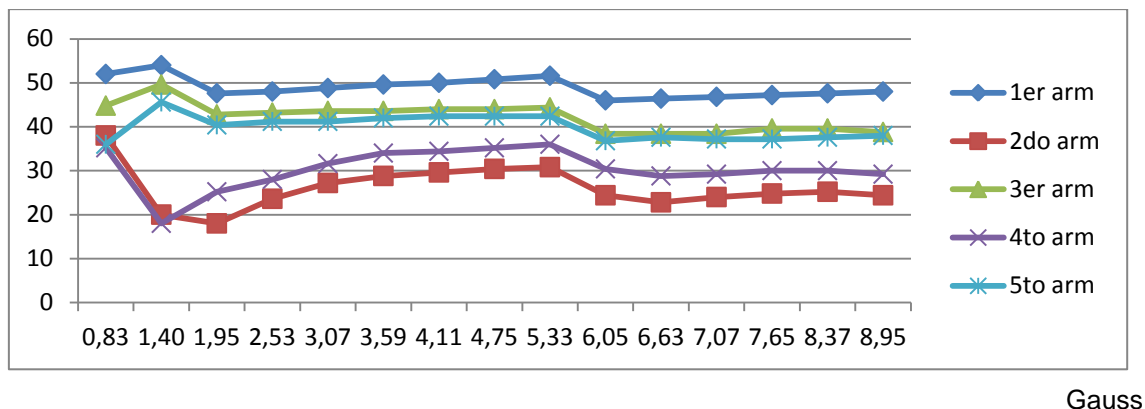


Fig. 5.16: hilo a 500Hz en bobina plana (3)

La principal diferencia que observamos respecto al análisis realizado con la cinta rica en Co, es la mayor contribución de armónicos de orden superior mostrada por términos generales, principalmente a campos bajos. Esto es debido a que dicho material, obtiene unas propiedades optimizadas en geometría de hilo, las cuales le otorgan un ciclo de histéresis rectangular alcanzando la saturación con valores bajos de campo magnético aplicado.

Los armónicos impares obtienen una ganancia muy buena a intensidades de campo reducidas, oscilando entre los 40 y 50 dB desde campos de  $B=0,83$  hasta 5,33 Gauss donde se ven ligeramente reducidos; en cambio la cinta alcanzaba dichos valores a partir de campos superiores a unos 4 Gauss. Los armónicos pares también tienen mejores resultados respecto de la cinta, aunque bastante inferiores que los impares.

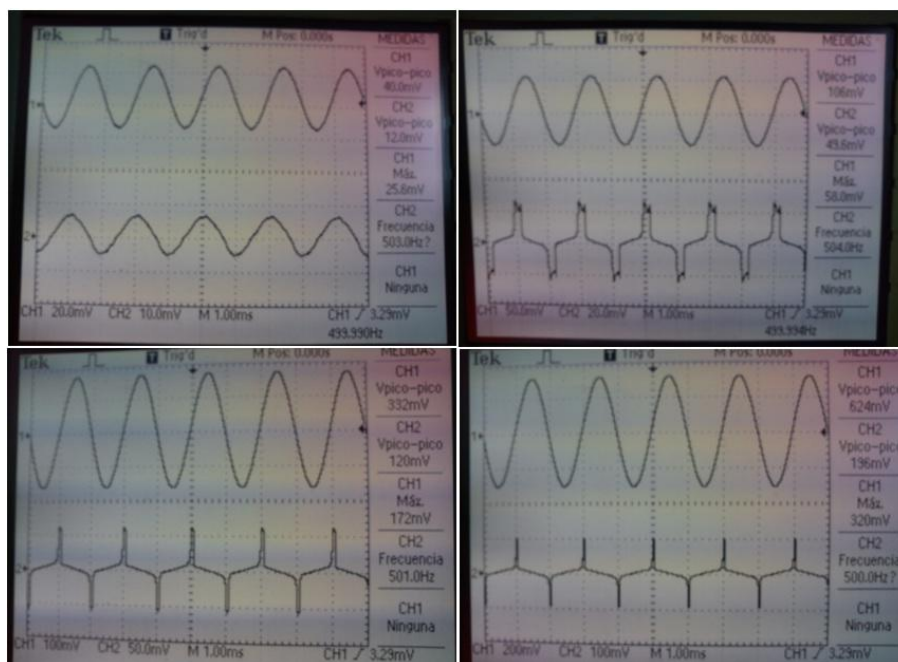


Fig. 5.17: La figura muestra dos señales, arriba la corriente de excitación y abajo la tensión inducida en el secundario cuyo campo se deforma ante la presencia del hilo ferromagnético.

Las distintas formas de la onda inducida se deben a la saturación, la primera imagen no muestra saturación conforme aumenta el  $B_{ap}$  la señal alcanza parcialmente la saturación con un campo aplicado mucho menor que el necesario para con la cinta.

Tras aumentar la frecuencia a 1 KHz, obtenemos los siguientes resultados, los cuales tanto en la cinta rica en Co, como en el hilo rico en Fe, son bastante similares respecto de los obtenidos a la mitad de frecuencia.

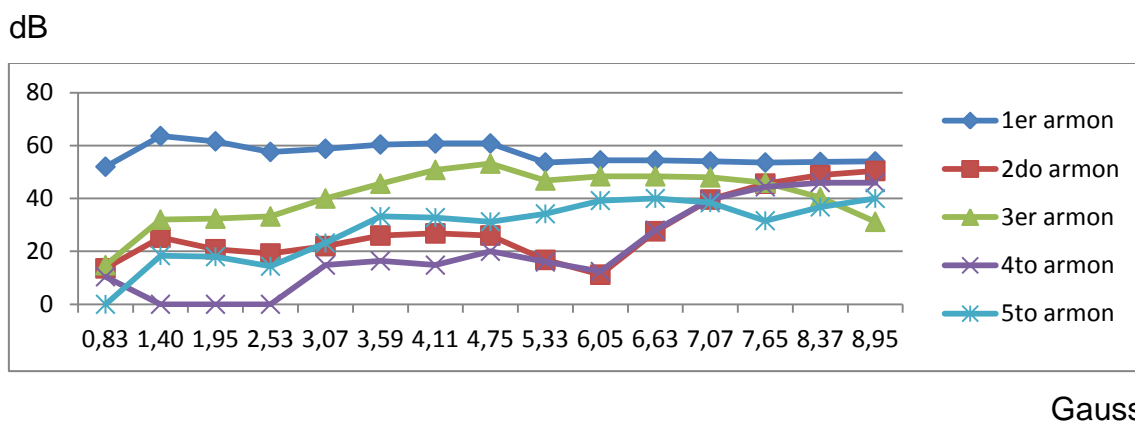
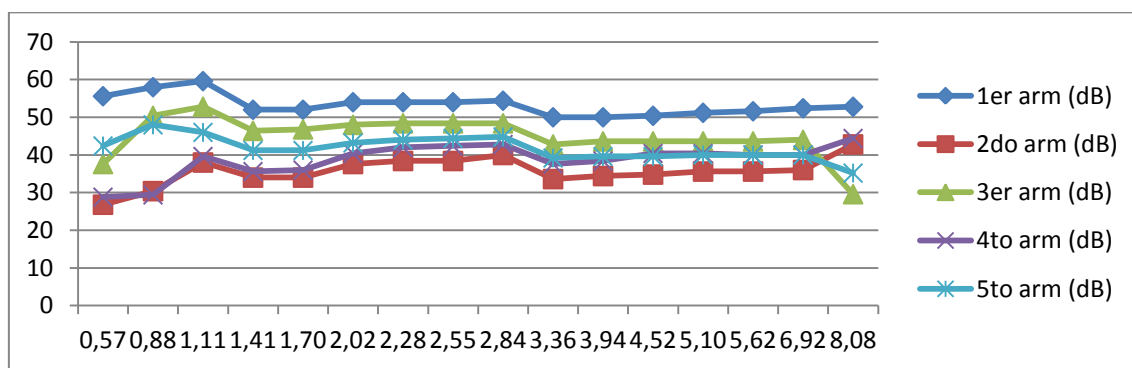


Fig. 5.18: cinta en bobina plana (3) a 1KHz

dB



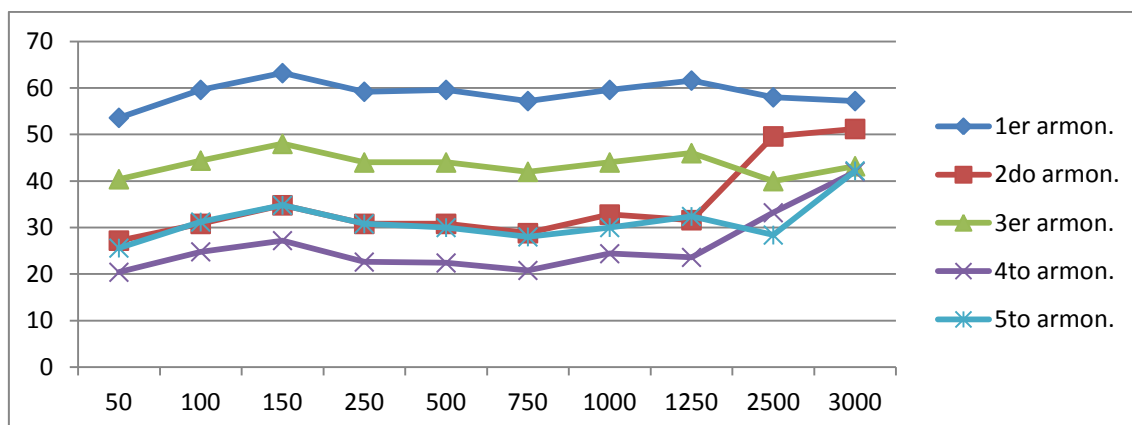
Gauss

Fig. 5.19.: Hilo amorfo biestable rico en Fe en bobina plana (3) a 1KHz

Por último, analizaremos la evolución de los armónicos en función de la frecuencia para una intensidad de campo aplicado de 4 Gauss.

Para ello se emplea la disposición anterior, con la bobina plana, se regula el campo aplicado en cada frecuencia para que sea 4 Gauss, y obtenemos los siguientes resultados.

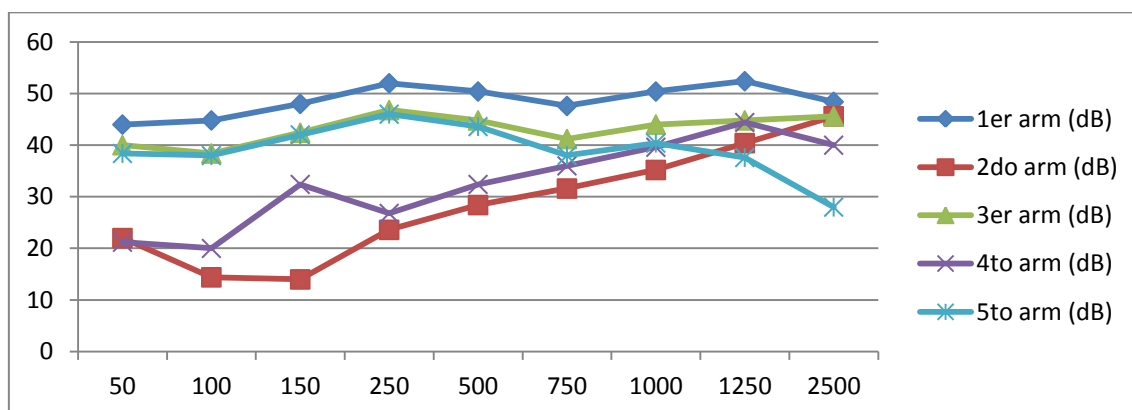
dB



Hz

Fig. 5.20: Análisis en frecuencia a 4 Gauss con bobina plana a 4G de la cinta rica en Co

dB



Hz

*Fig. 5.21: Análisis frecuencia con bobina plana (3) del hilo rico en Fe a 4Gauss*

El análisis en frecuencia de los armónicos generados por la cinta muestra un comportamiento similar entre los distintos armónicos los cuales siguen una tendencia constante a lo largo de las distintas frecuencias. En cambio cuando analizamos el hilo se ve como los armónicos impares siguen un comportamiento más estable que los armónicos pares cuya ganancia es inferior y más variable en función de la frecuencia, dichos armónicos pares tienen un tendencia creciente entre los 500 y los 2500 Hz. Se ve como el quinto armónico obtienen una ganancia mucho mayor cuando trabajamos con el hilo, llegando a ser cercana al doble para los 1250 Hz

El primer armónico tiene mayor ganancia con la cinta, pero el tercer y quinto armónico funcionan mejor en el caso del hilo rico en Fe. Los armónicos pares generados por ambos materiales son muy bajos respecto a las señales de los impares, aunque en torno a los 750 o 1000Hz el hilo obtienen buenos resultados.

En el segundo armónico vemos como en el hilo tiene una menor componente a bajas frecuencias (50-150Hz) y que a partir de los 250Hz la ganancia aumenta con la frecuencia. Por el contrario en la cinta amorfa rica en Co el comportamiento del 2º armónico es el mismo que el del primero, pero con



una ganancia constantemente menor que oscila entre los 15 y 20 dB por debajo de la ganancia del hilo rico en Fe.

El tercer armónico es considerablemente superior el producido por el hilo que el de la cinta, siendo mínimo esta diferencia a la frecuencia de 250 Hz y máxima a 750Khz siendo superior en cerca de 1 década la componente generada por el hilo.

### **5.3.2. Caracterización del material frente a un campo de continua**

En el presente ensayo, se estudia la evolución de la amplitud de los diferentes armónicos en función del campo magnético continuo aplicado

Para ello, los carretes Helmholtz o bobinas de excitación son colocados con orientación Norte, con el objetivo de eliminar la contribución del campo magnético terrestre. La disposición del experimente continúa siendo la misma, con el secundario plano, pero en esta ocasión, mediante la opción OFFSET del generador de funciones, al campo alterno se le superpone un campo continuo.

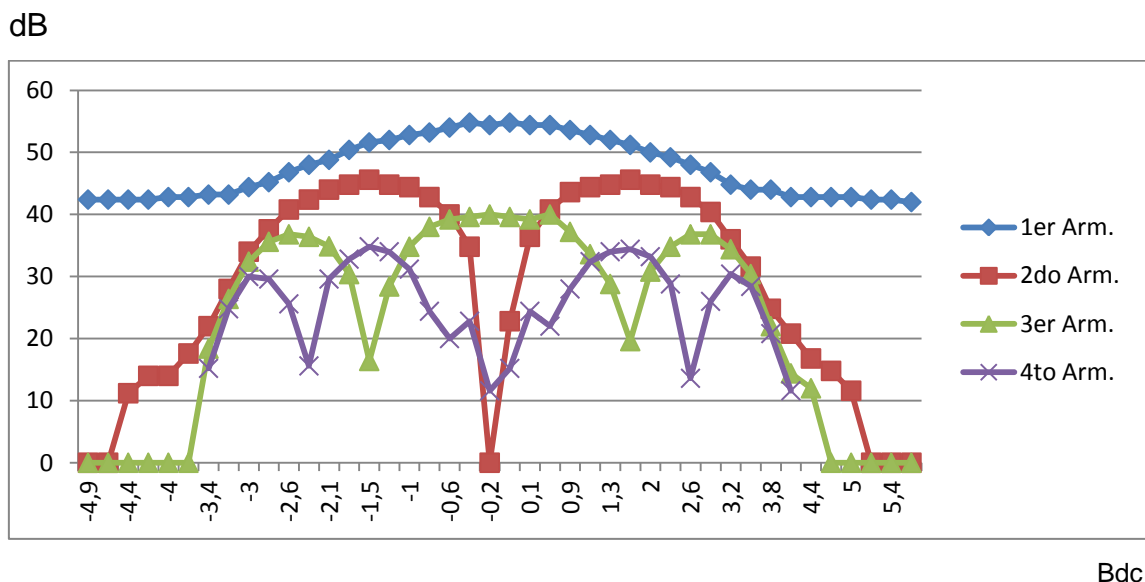
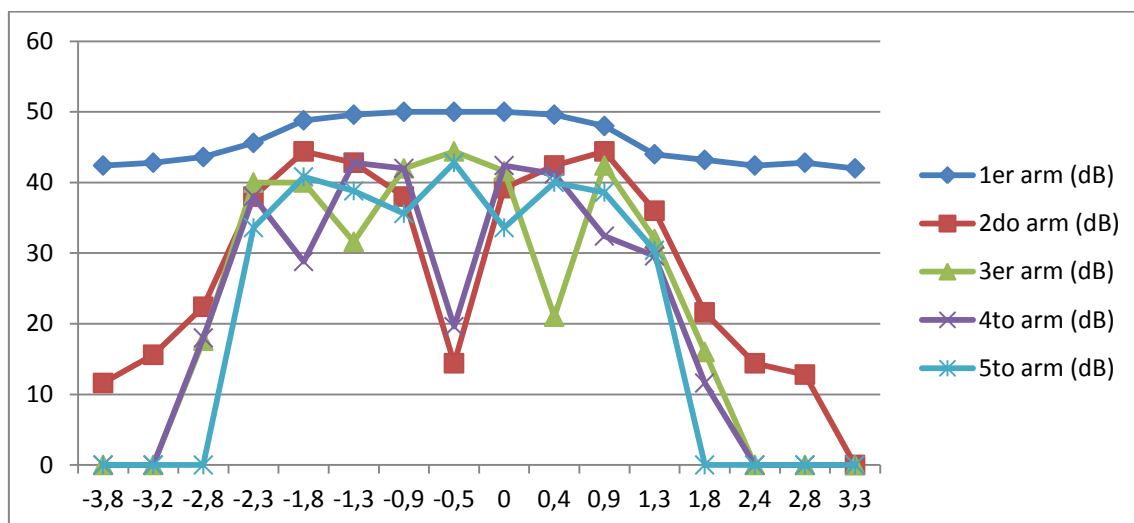


Fig. 5.22: Cinta rica en Co introducida en una bobina plana (3) a 4Gauss y 1 KHz.



dB



Vdc

Fig. 5.23: hilo rico en Fe de 0,125mm de diámetro introducido en una bobina plana (3) a 1KHz a 4 Gauss variando la componente de campo continuo (offset)

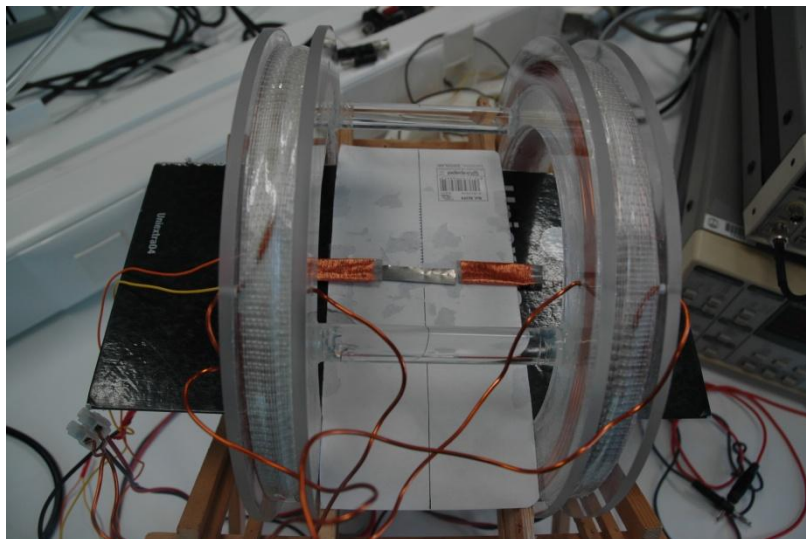
Con el presente ensayo podemos observar la variación de los armónicos generados por el material, en función de un campo continuo, con ello podremos predecir el comportamiento del material blando acompañado de la cinta semidura imanada, la cual creará un campo continuo, haciendo variar los armónicos inducidos, siguiendo la forma simétrica de las figuras. La principal conclusión que podemos obtener es que para la eliminación de los armónicos superiores al fundamental, el campo continuo necesario en la cinta es mayor, superior a 5 Gauss. En cambio, el hilo ferromagnético, cuya grafica (ver fig. 5.23) se observa más estrecha, necesita un aporte mucho menor de campo continuo (alrededor de 3,5 Gauss serian necesarios para suprimir la inducción armónica de dicho material).

Esto equivale a decir, que si usamos el hilo en la etiqueta, cuando el material semiduro se encuentre en estado remanente, apenas existirá armónicos inducidos, mientras que con la cinta obtendremos una variación de los valores de armónicos inducidos al no ser suficiente el campo continuo aplicado para saturar completamente el material rico en Co, y obteniendo una

lectura armónica que variara en función del  $B_{dc}$  remanente que almacene la cinta semidura.

### **5.3.3. Distancia de detección entre dos bobinas receptoras.**

En este apartado se estudia el comportamiento de los materiales blandos, situados entre dos bobinas receptoras, iguales y en oposición (lo cual minimiza el primer armónico); dichas bobinas inicialmente situadas a 4 cm (longitud aproximada de las muestras) una de otra, se irán alejando hasta que las señales generadas por el material blando sean imperceptibles. Con ello, se calcula la tasa de detección de la etiqueta EAS armónica en función de la distancia que separará los secundarios.



*Fig. 5.24: Se muestra la posición inicial del ensayo, con las bobinas rectoras a una distancia de 4cm, la cual se irá aumentando paulatinamente hasta los 20 cm.*

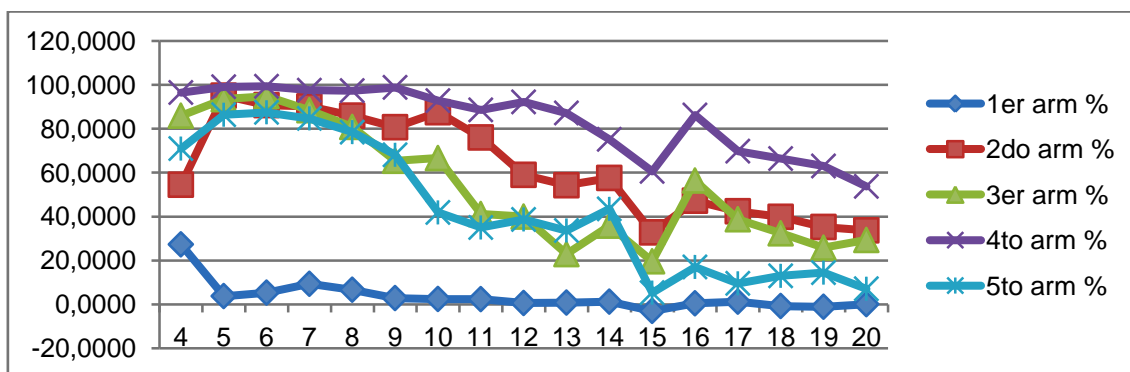
Para este ensayo se ha dispuesto de del mismo montaje de la figura 23, pero en lugar del osciloscopio, se emplea el lock-in, con el cual obtendremos con precisión los voltajes inducidos en cada armónico. Además se emplean dos bobinas en serie-oposición para eliminar la contribución del primer armónico en el voltaje inducido, asociado con el campo magnético en el vacío.

Los porcentajes son calculados mediante la fórmula:

$$\% \text{detección} = (V_{\text{arm con muestra}} - V_{\text{arm sin muestra}}) \cdot 100 / V_{\text{arm con muestra}}$$

ecuación 5.2

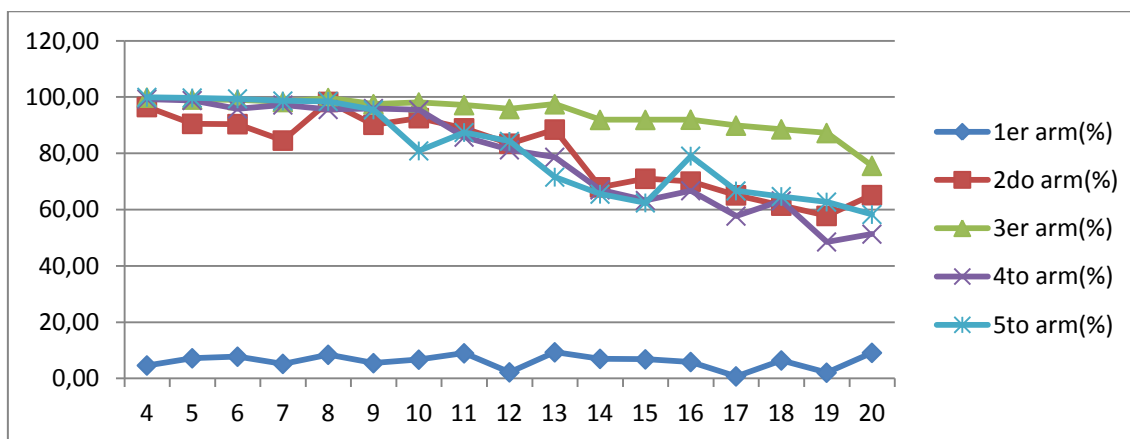
Tasa de detección (%)



Cm

Fig. 5.25: Bobinas planas a 1 KHz y 4G, análisis en función de la distancia entre secundarios respecto de la cinta amorfa rica en Co colocada en el centro de las bobinas.

Tasa de detección (%)



cm

Fig. 5.26: Bobinas planas a 4G (0,54A) análisis en función de la distancia entre secundarios respecto del hilo biestable rico en Fe situado en el punto medio entre ambos secundarios.

Como muestran las gráficas 5.25 y 5.26, la cinta rica en Co, a partir de los 10 cm de distancia todas señales armónicas se ven afectadas por la distancia a la que se encuentran las bobinas receptoras, pudiendo llegar a

perder hasta un 60% de probabilidades de detectar el material a los 20 cm, como sucede con el quinto armónico, pero también el segundo y tercero se ven seriamente reducidos.

Por otro lado, ante el empleo del hilo ferromagnético, y debido a sus propiedades optimizadas y a su ciclo de histéresis más cuadrado, la generación de armónicos sigue siendo perceptible en todo el rango estudiado, pasando de tasas alrededor del 80-90% en los primeros 13 cm, hasta verse reducido en torno al 50-70% para distancias mayores. Por lo tanto, ante el empleo de hilos ferromagnéticos obtenidos por enfriamiento ultrarrápido, se podrán emplear antenas receptoras a mayor distancia que la que nos permitiría el uso de cinta rica en Co, también obtenidas por enfriamiento ultrarrápido.

#### **5.3.4. Probabilidad de detección del material ferromagnético blando situado entre dos 2 bobinas planas.**

En el presente apartado, se estudiarán las tasas de detección para dos bobinas planas en función del campo magnético, las cuales están unidas en serie y en oposición, y situadas a 5 cm una de la otra, en la misma orientación que los carretes Helmholtz de excitación; y con el material blando a estudio (cinta amorfa rica en Co, e hilo amorfo biestable rico en Fe) situado entre ellas, longitudinalmente tal como muestra el apartado 5.3.3.

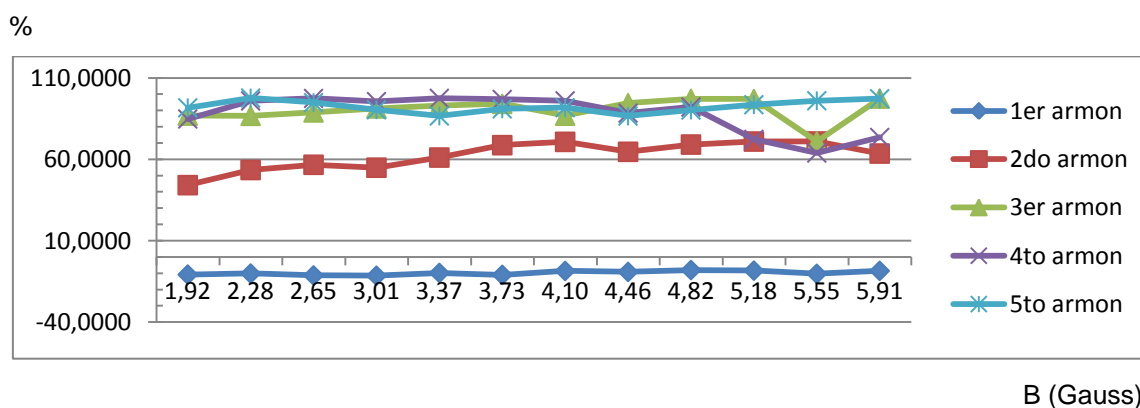


Fig. 5.27: Tasa de detección de presencia con secundarios planos (3), del material amorfo rico en Co (cinta)

%

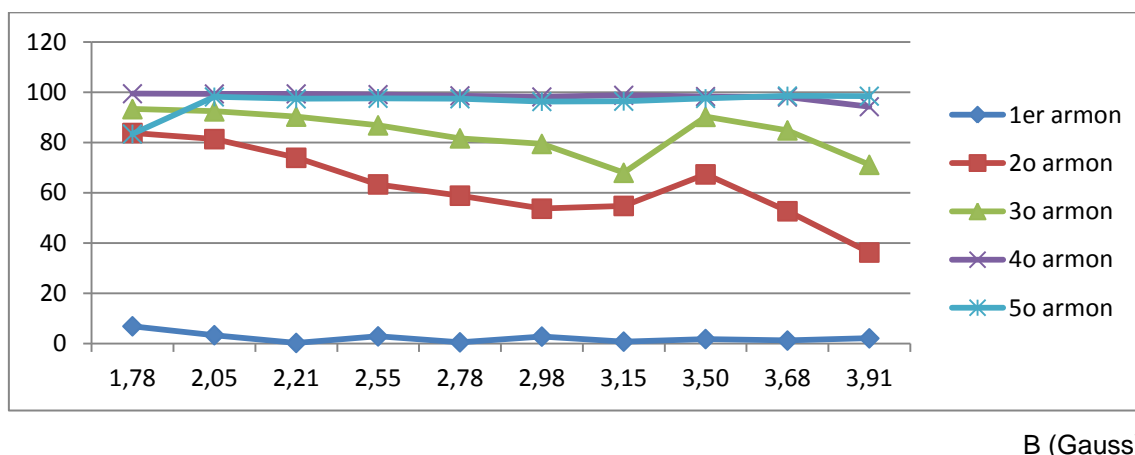


Fig. 5.28: Porcentaje de detección con secundarios planos (3), en presencia del hilo amorfo biestable rico en Fe

Los resultados del ensayo muestran tendencias diferentes según el material en cuestión, por un lado el hilo rico en Fe muestra a unos armónicos cuarto y quinto con tasas de detección cercanas al 100% en todo el rango analizado, y el segundo y tercero muestran una tendencia decreciente, con resultados en campos aplicados menores a 2,5 Gauss del orden del 80-90%, siendo estos bajos campos aplicados, en los que obtenemos mejor lectura armónica, que a campos mayores.

Por el contrario, el otro material analizado, cinta rica en Co, a pesar de mostrar también una tasa de detección de la etiqueta antirrobo también muy elevada para los armónicos del tercero al quinto, una probabilidad muy alta de ser detectado por el sistema, que es ligeramente inferior a la presentada por el hilo sobre todo en el cuarto y quinto. Un segundo armónico, se presenta a campos bajos con muy poca variación, por lo que la señal armónica inducida es muy baja, y su tendencia al alza es fruto de un aumento en la corriente de excitación del campo magnético.

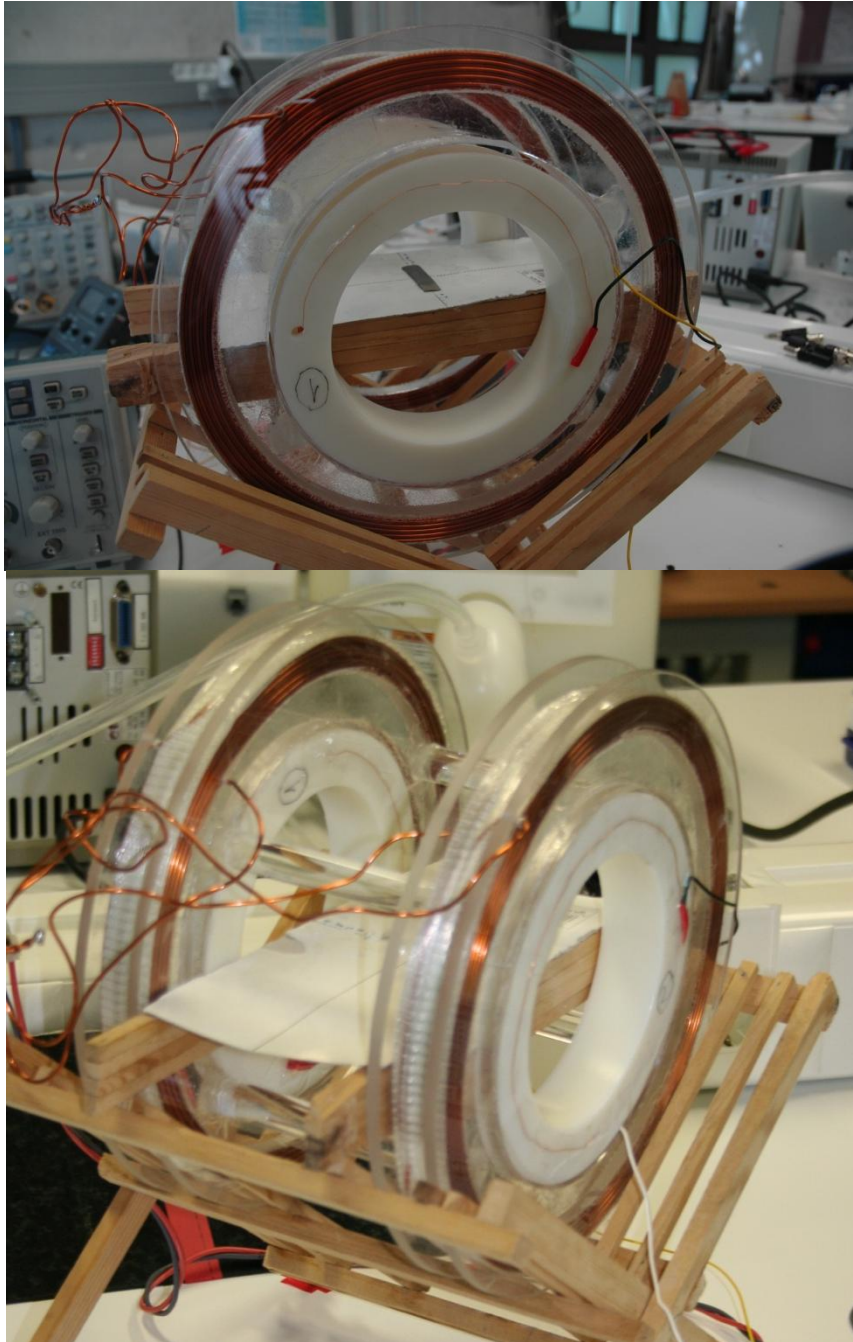
Como por cuestión de consumo es preferible el uso de campos más bajos, las propiedades del hilo son idóneas para este tipo de etiquetas, no siendo necesario elevados campos para alimentar el sistema.

### **5.3.5 Detección del material magnético blando en bobinas detectoras (4)**

Para este estudio, cambiaremos las dos bobinas planas, por otras dos bobinas receptoras, que irán alojadas concéntricamente y en el interior de las bobinas de excitación, para así ver la posibilidad del empleo de estos materiales en las etiquetas armónicas antirrobo. Para ello, el sistema de generación del campo y el sistema de bobinas receptoras de la señal característica para hacer saltar la alarma, deben ir en las antenas que se colocaran para delimitar la zona de detección.

Estas nuevas bobinas, denominadas detectoras, tienen N vueltas, están en oposición y tienen una resistencia de aproximadamente  $50,5\Omega$  cada una (ver fig. 4.9).

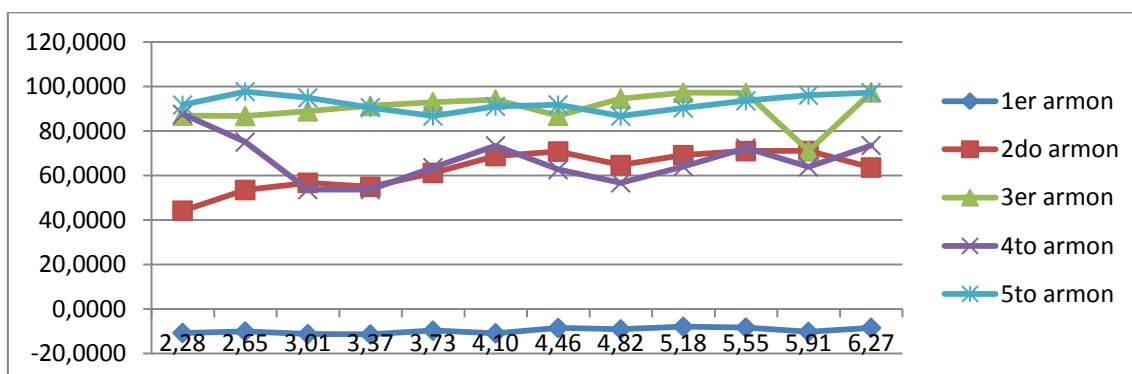
Volviendo a colocar el material entre ambas bobinas, longitudinalmente al eje de las bobinas, en el punto medio (recordemos que la longitud del carrete Helmholtz es de 10cm) observamos la evolución de las distintas señales electromagnéticas y su posible detección en función del campo resultante de aplicar una corriente alterna sinusoidal a las bobinas Helmholtz o de excitación.



*Fig. 5.29: Secundarios detectores circunscritos en el carrito Helmholtz*



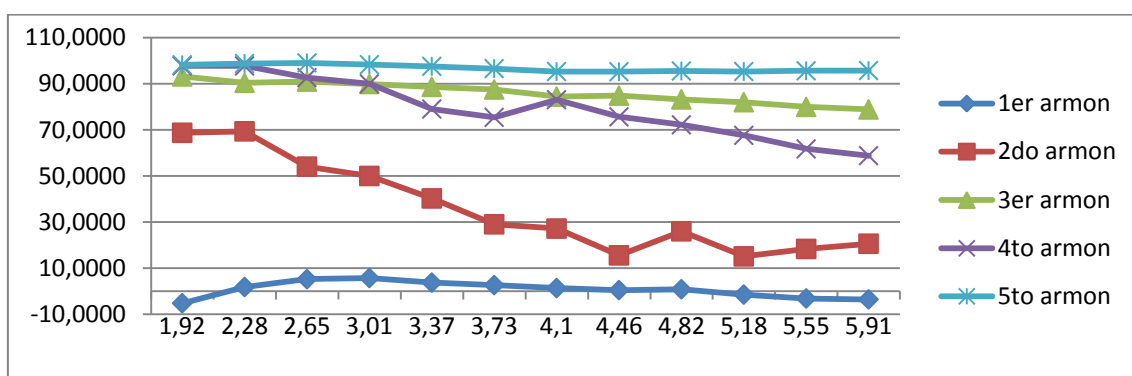
%



B(Gauss)

Fig. 5.30: Porcentaje de detección del material rico en Co en bobinas detectoras.

%



B(Gauss)

Fig. 5.31: Porcentaje de detección del material rico en Fe en bobinas receptoras finales.

Las figuras 5.30 y 5.31 muestran como la cinta de Co funciona bien con campos más amplios, los resultados aquí obtenidos son bastante peores que con el hilo, que funciona muy bien hasta los 3Gauss. Los armónicos con los que mejor podríamos detectar la etiqueta antirrobo son del 3º al 5º, presentando el segundo armónico una baja variación en el lock-in al medir las tensiones inducidas cuando está , la etiqueta, en el interior de la zona de interrogación y cuando no.



### 5.3.6 Análisis de la etiqueta completa.

Para finalizar, repetiremos estudios anteriores, pero en esta ocasión con la etiqueta EAS armónica antirrobo completa. Para ello, la muestra blanda (hilo o cinta) se analizara junto a una cinta semidura, extraída de una etiqueta comercial mediante el empleo de una sola bobina plana.

En las figuras observamos la ganancia en armónicos, a 1KHz, primero de la cinta rica en Co con el material semiduro sin imanar, y posteriormente, la misma muestra con el material ferromagnético semiduro imanado, por lo tanto creando un campo continuo, el cual satura al material blando.

Dicho ensayo se lleva a cabo como el primer ensayo realizado, es decir en una sola bobina rectora, plana.

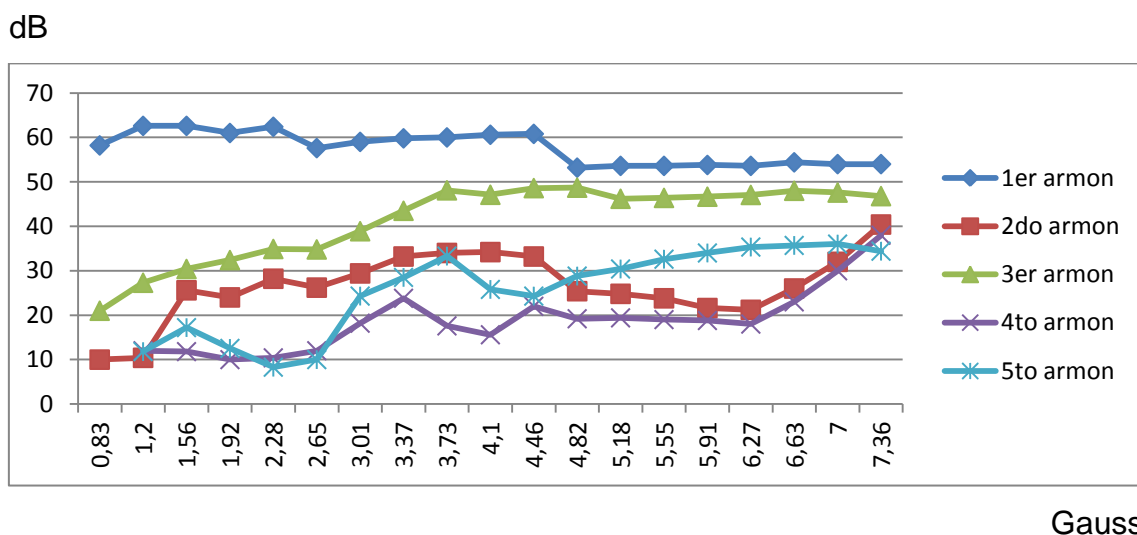
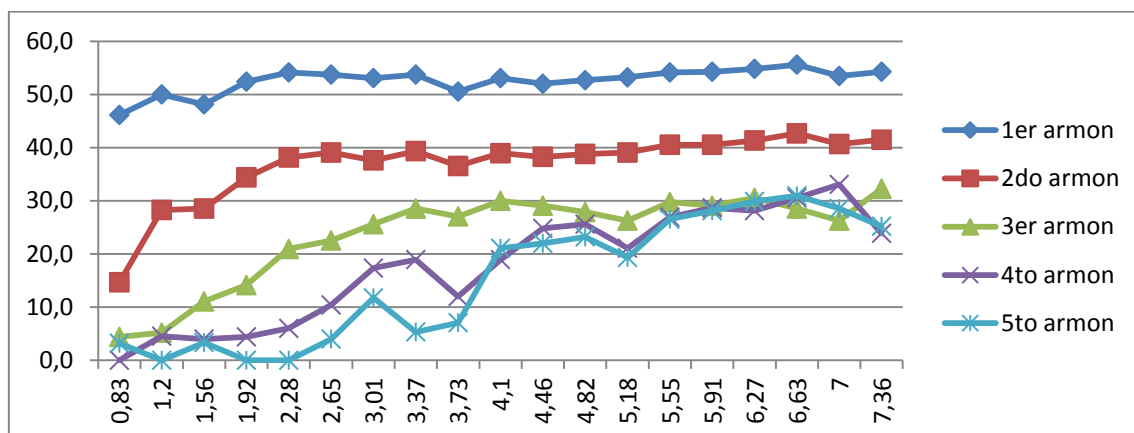


Fig. 5.32: Cinta amorfa blanda con cinta amorfa semidura sin campo remanente (etiqueta encendida)

dB



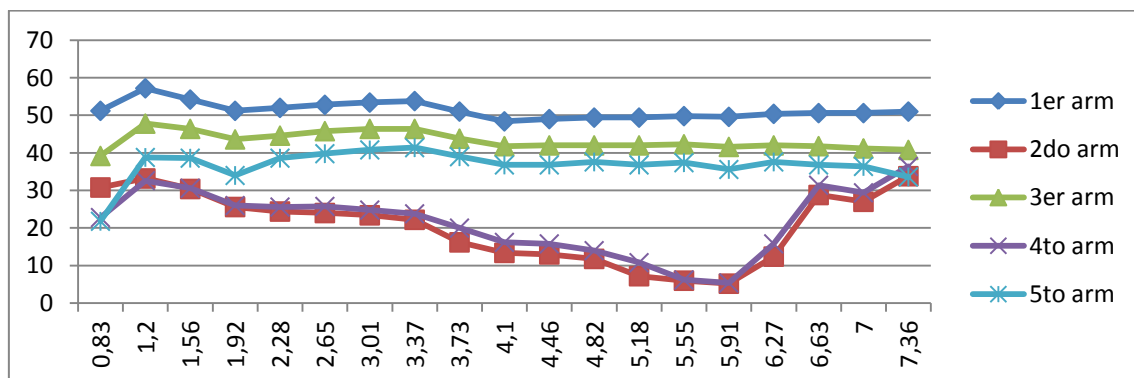
Gauss

Fig. 5.33: Cinta amorfa blanda con cinta amorfa semidura con campo remanente (etiqueta apagada)

Los resultados presentados son similares a los obtenidos en el apartado 5.3.2., por lo tanto el material semiduro sin imanar, no muestra influencia alguna sobre la muestra blanda.

A continuación, y tras llevar el material semiduro a la saturación con un imán (en este caso del tipo Ferrita), tras retirarlo este se queda imanado, en su estado remanente, presentando los siguientes resultados de la etiqueta.

dB



Gauss

Fig. 5.34: Hilo ferromagnético y cinta semidura desmagnetizada (etiqueta encendida)

dB

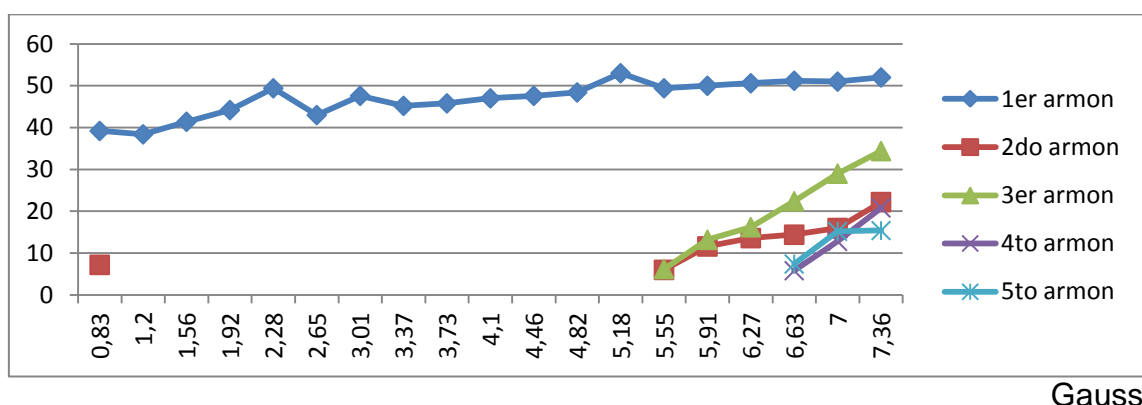


Fig. 5.35: Hilo amorfo biestable y cinta amorfa semidura magnetizada (etiqueta apagada)

Como se ha visto en el apartado de caracterización de los materiales blandos frente a un campo de continua, se observa la variación de los armónicos. Dado el campo de continua que crea la cinta semidura, la ganancia del segundo y del tercer armónico aumenta hasta un máximo de 20 dB, mientras que el resto de armónicos apenas sufre variaciones, en el caso de la cinta rica en Co.

En cambio con el hilo, como el comportamiento observado frente a un campo continua, se observa que sus armónicos tienden a desaparecer con un campo bastante menor, tal y como muestran la figura 5.35.

Tal y como mostraba el estudio anterior donde se relacionaba la amplitud de armónicos frente a un campo de continua, se observa como con la cinta rica en Co, el campo continuo creado por la cinta semidura no es suficiente para saturar, anular la componente armónica, del material blando, dando lugar a una variación de las ganancias; por otro lado, el comportamiento del hilo ,dado que como hemos visto anteriormente acepta un rango de campo continuo más estrecho, el campo creado por el material semiduro es suficiente para saturar el material prácticamente en su totalidad, salvo ligeras ganancias que se aprecian para campos de excitación elevados.

Por tanto se demuestra que para dicha aplicación estos materiales mejorarían considerablemente las etiquetas antirrobo basadas en armónicos, dada la gran diferencia de la etiqueta basada en hilo ricos en Fe desconectado (imanada) y a la etiqueta con cinta rica en Co en el mismo estado, se aprecia lo ventajoso del empleo de dichos hilos.

Por último, se repitió el estudio con las bobinas detectoras en los dos estados de la etiqueta; medimos el porcentaje de detección de la de ambos materiales con en presencia del material semiduro en sus dos estados. Obtenemos las siguientes graficas, las cuales ya han sido estudiadas anteriormente.

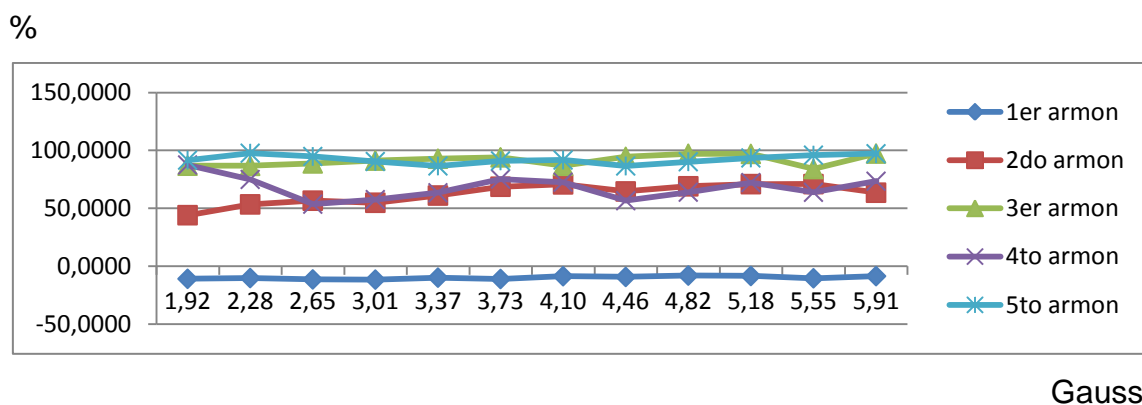


Fig. 5.36: Detección de la cinta amorfa rica en Co con el material semiduro sin magnetizar (ON)

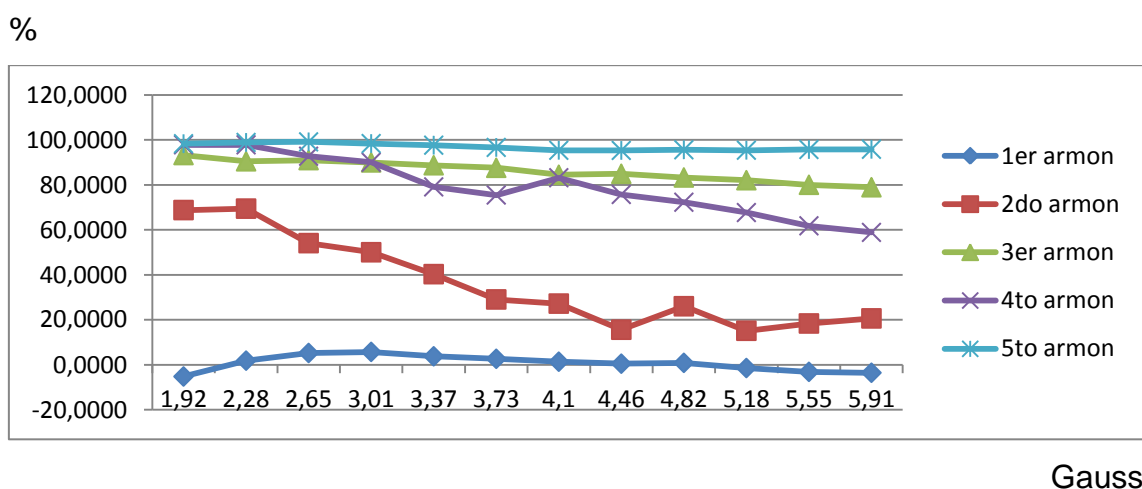


Fig. 5.36: Detección del hilo con el material duro sin imanar (ON)

De nuevo, cuando la cinta semi-dura se encuentra desimanada, ambos materiales presentan una alta tasa de detección para armónicos superiores al fundamental

Si volvemos a imanar la cinta semidura, se obtienen los siguientes resultados

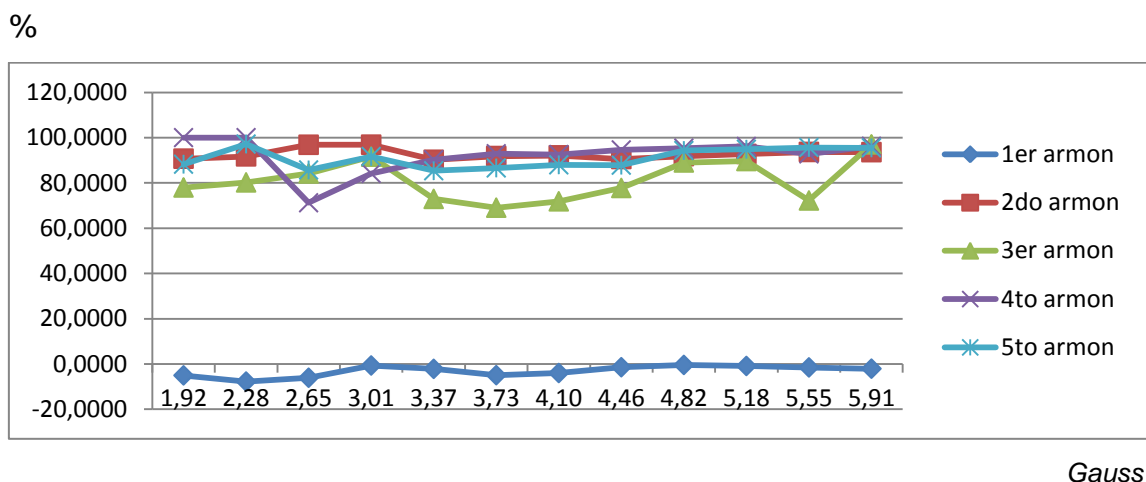


Fig. 5.38: Detección cinta con cinta semidura magnetizada (OFF)

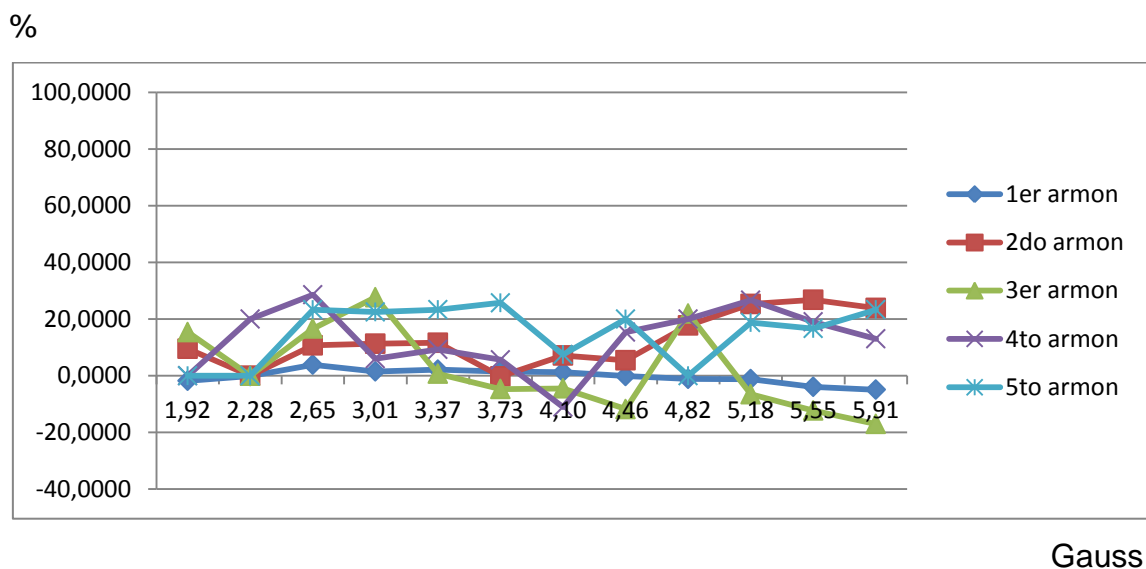


Fig. 5.39: Detección hilo con cinta semidura magnetizada (OFF)

Dado que la cinta semidura está creando un campo de continua que modifica los armónicos del material blando, el porcentaje de detección debería ser relativamente bajo; por el contrario se observa que la cinta rica en Co tiene probabilidades muy elevada de hacer saltar la alarma (falsos positivos); en cambio el hilo rico en Fe, los valores pico no alcanzan el 30%.

Por tanto la “invisibilidad” de la etiqueta EAS cuyo material blando es rico en Fe llega a ser un 60% más fiable que la misma etiqueta cuyo material magnético blando es rico en Co. Si a esto le sumamos lo económico del hierro frente al cobalto, queda comprobada la viabilidad del empleo de dichas aleaciones ricas en Fe, obtenidas por enfriamiento ultrarrápido en geometría de hilo; y descartando el empleo de la cinta amorfa rica en Co.

# **CAPÍTULO ÚLTIMO**

## **-CONCLUSIÓN-**

## **Conclusión:**

Para trabajar a campos más bajos, el hilo de material amorfo biestable rico en Fe presenta unas propiedades idóneas para su utilización en estas etiquetas EAS, mientras que la cinta a estos campos tan bajos no funciona con la suficiente precisión, siendo necesario subir el campo aplicado para asegurar un buen funcionamiento.

Además el mayor precio del cobalto respecto del hierro del hilo, y el menor volumen de material necesario para el hilo, lo hace más económico. Por tanto, para realizar dichas etiquetas antirrobo se podría sustituir el material típico del tipo Permalloy o Metglass, aleaciones similares a la cinta, por el uso de los hilos amorfos y biestables, ricos en Fe, obtenidos por enfriamiento ultrarrápido, cuyas propiedades magnéticas no sólo mejoraran las etiquetas actuales, sino que además se reduce su precio.

Además, el sistema de detección debería encontrarse basado en la detección de armónicos de orden superior como podría ser el quinto, dado que este ha presentado resultado muy positivo a lo largo de su estudio.



# **-BIBLIOGRAFÍA-**

## **Bibliografía**

- [1] W. Göpel, J. Hesse, J. N. Zemel. "Sensors A Comprehensive Survey"  
Magnetic sensors, vol. 5 (VCH, New York) 157
- [2] R. C. O'Handley. "Magnetic Materials for EAS Sensors". Journal of Materials  
Engineering and Performance, vol. 2. (1993) 211
- [3] Giselher Herzer. "Magnetic materials for electronic article surveillance".  
Journal of magnetism and magnetic materials. (2002) 599
- [4] D. C. Jiles. "Recent advances and future directions in magnetic materials".  
Acta Materialia Inc. (2003) 5907
- [5] Sergey Gudoshnikov, Nikolai Usov, Arcady Zhukov, Valentina Zhukova,  
Pavel Palvanov, Boris Ljumbimov, Olga Serebryakova and Sergey Gorbunov.  
"Evaluation of use of magnetically bistable microwires for magnetic labels". PSSA  
(Wiley-VCH; 2011) 526
- [6] Paul A. Tipler, Gene Mosca. "Física para la ciencia y la tecnología", vol. 2, 5ª  
edición. (Reverté, 2005) 799
- [7] Cristina Gómez Polo. "Magnetismo de los hilos amorfos: comportamiento  
biestable y relajación estructural". Universidad de Madrid (1992) 19
- [8] M. Vázquez, C. Gómez-Polo. "Amorphous and Nanocrystalline Wires and  
Microwires with Giant Barkhausen Jumps for Magnetic Sensor Applications". Journal of  
Korean Physical Society, vol. 31. (1997)
- [9] Goodfellow <http://www.goodfellow.com/sp/>
- [10] Wikipedia <http://www.wikipedia.org/>
- [11] R. G. Carter "electromagnetismo para ingeniería electrónica. Segunda  
edición. (Addison-Wesley Iberoamericana, 1993) 77.